

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

**ITO CAM ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE,
CIGS/RUBRENE, InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE
HETEROEKLEMLERİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

FATİH ÜNAL

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tekin İZGİ

OCAK 2021

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

**ITO CAM ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE,
CIGS/RUBRENE, InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE
HETEROEKKLEMLERİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

FATİH ÜNAL

23615120254

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Tekin İZGİ

Eş Danışman: Prof. Dr. Behzad BARIŞ

OCAK 2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tekin İZGİ'ye, eş danışmanım Sayın Prof. Dr. Behzad BARIŞ'a,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince benden her türlü desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime,

Karşılaştığım zorlukların nasıl üstesinden gelebileceğimi öğreten ve maalesef aramızdan ayrılan yüksek lisans danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan MAMMADOV'a, değerli bilgi ve tecrübelerini benimle her daim paylaşan ve yardımını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Serdar Karadeniz'e, lisans eğitimimden bu yana tanıdığım ve her zaman desteğini gördüğüm, kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Harun KAYA'ya, arkadaşım Sayın Kimyager Rıdvan İLGÜN'e ve Sayın Öğr. Gör. Samet CANTÜRK'e,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, GRÜMLAB'a

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “ITO CAM ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE, CIGS/RUBRENE, InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE HETEROEKLEMLERİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Fatih ÜNAL



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	I
ONUR SÖZÜ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XVI
ÖZET	XVIII
ABSTRACT	XIX
1.GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1 Yarıiletkenler	4
2.1.1 Yarıiletkenlerin yapısal özellikleri	4
2.1.2 Yarıiletkenlerin band yapısı	5
2.1.3 Asal yarıiletkenler	7
2.1.4 Katkılı yarıiletkenler	7
2.1.4.1 n ve p-tipi yarıiletkenler	8
2.1.5 Yarıiletkenlerin optik özellikleri	8
2.1.5.1 Soğurma olayı.....	9
2.1.5.1.1 Doğrudan ve dolaylı soğurma	9
2.1.5.2 Yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesi	12
2.1.6 Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri.....	12
2.1.6.1 Asal yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu	12
2.1.6.2 Katkılı yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu	13
2.1.6.3 Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik	14
2.1.7 Organik yarıiletkenler	16
2.1.7.1 Rubrene organik yarıiletken	18
2.1.7.2 Coronene organik yarıiletken	21
2.1.8 İnorganik yarıiletkenler	23
2.1.8.1 InSe inorganik yarıiletken	24
2.1.8.2 CIS inorganik yarıiletken	26
2.1.8.3 CIGS inorganik yarıiletken.....	28
2.2 İnce Film Analiz Yöntemleri	29

2.2.1 X-Işınları difraksiyonu (XRD)	29
2.2.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	30
2.2.3 Enerji dağılım spektroskopisi (EDS).....	31
2.2.4 Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)	32
2.2.5 UV-Vis spektrofotometresi	34
2.2.6 I-V karakterizasyonu ve diyot parametrelerinin belirlenmesi.....	34
2.3 İnce Film Üretim Yöntemleri.....	37
2.3.1 Fiziksel buhar biriktirme	37
2.3.1.1 Termal buharlaştırma.....	37
2.3.2 Elektrokimyasal kaplama yöntemi	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM	43
3.1 Cam/ITO Alt Tabanlarının Hazırlanması	44
3.2 InSe İnce Filmlerinin Elde Edilmesi.....	45
3.3 CIS İnce Filmlerinin Elde Edilmesi.....	45
3.4 CIGS İnce Filmlerinin Elde Edilmesi	46
3.5 InSe, CIS ve CIGS İnce Filmlerinin Tavlanması	46
3.5.1 Cam/ITO/InSe ince filmlerinin tavlama	46
3.5.2 Cam/ITO/CIS ince filmlerinin tavlama	46
3.5.3 Cam/ITO/CIGS ince filmlerinin tavlama	46
3.6 Cam/ITO/InSe-InSe(tav)-CIS-CIS(tav)-CIGS-CIGS(tav)/rubrene Heteroeklemlerinin Elde Edilmesi	47
3.7 Cam/ITO/InSe-InSe(tav)-CIS-CIS(tav)-CIGS-CIGS(tav)/coronene Heteroeklemlerinin Elde Edilmesi	47
3.8 Analizlerde Kullanılan Cihazlar	47
3.8.1 XRD analizi.....	47
3.8.2 SEM analizi	48
3.8.3 EDS analizi.....	48
3.8.4 AFM analizi.....	48
3.8.5 UV-VİS analizi.....	49
3.8.6 I-V ve güneş similatörü analizi	49
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	51
4.1 Filmlerin Kalınlıklarının Belirlenmesi.....	51
4.2 Yapısal Özellikler	52
4.2.1 XRD analizi.....	52
4.2.1.1 Cam/ITO/InSe ince filminin XRD analizi.....	52
4.2.1.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin XRD analizi	53

4.2.1.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin XRD analizi	54
4.2.1.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi	54
4.2.1.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin XRD analizi	55
4.2.1.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin XRD analizi	56
4.2.1.7 Cam/ITO/CIS ince filminin XRD analizi	57
4.2.1.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin XRD analizi	58
4.2.1.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin XRD analizi	60
4.2.1.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi	61
4.2.1.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin XRD analizi	62
4.2.1.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin XRD analizi.....	63
4.2.1.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin XRD analizi	64
4.2.1.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin XRD analizi	66
4.2.1.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin XRD analizi.....	67
4.2.1.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi	68
4.2.1.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin XRD analizi	69
4.2.1.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin XRD analizi.....	70
4.2.2 SEM analizi	71
4.2.2.1 Cam/ITO/InSe ince filminin SEM analizi	71
4.2.2.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin SEM analizi	72
4.2.2.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin SEM analizi.....	73
4.2.2.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi	74
4.2.2.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin SEM analizi	75
4.2.2.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin SEM analizi.....	76
4.2.2.7 Cam/ITO/CIS ince filminin SEM analizi	77
4.2.2.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin SEM analizi.....	78
4.2.2.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin SEM analizi.....	79
4.2.2.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi	80
4.2.2.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin SEM analizi	81
4.2.2.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin SEM analizi.....	82
4.2.2.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin SEM analizi	83
4.2.2.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin SEM analizi.....	84
4.2.2.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin SEM analizi.....	85
4.2.2.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi	86
4.2.2.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin SEM analizi	87
4.2.2.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin SEM analizi.....	88

4.2.3 EDS analizi.....	89
4.2.3.1 Cam/ITO/InSe ince filminin EDS analizi.....	89
4.2.3.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin EDS analizi	90
4.2.3.3 Cam/ITO/CIS ince filminin EDS analizi.....	91
4.2.3.4 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin EDS analizi	92
4.2.3.5 Cam/ITO/CIGS ince filminin EDS analizi.....	94
4.2.3.6 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin EDS analizi	95
4.2.4 AFM analizi.....	96
4.2.4.1 Cam/ITO/InSe ince filminin AFM analizi.....	96
4.2.4.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin AFM analizi	98
4.2.4.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin AFM analizi	99
4.2.4.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi.....	101
4.2.4.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin AFM analizi.....	102
4.2.4.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin AFM analizi	104
4.2.4.7 Cam/ITO/CIS ince filminin AFM analizi.....	105
4.2.4.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin AFM analizi	107
4.2.4.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin AFM analizi	108
4.2.4.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi.....	110
4.2.4.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin AFM analizi.....	111
4.2.4.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin AFM analizi	113
4.2.4.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin AFM analizi.....	114
4.2.4.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin AFM analizi	116
4.2.4.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin AFM analizi	117
4.2.4.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi.....	119
4.2.4.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin AFM analizi	120
4.2.4.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin AFM analizi	122
4.3 Optiksel Özellikler.....	123
4.3.1 Cam/ITO/InSe ince filminin optiksel özellikleri.....	123
4.3.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optiksel özellikleri	125
4.3.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optiksel özellikleri	126
4.3.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri.....	128
4.3.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optiksel özellikleri.....	129
4.3.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri	131
4.3.7 Cam/ITO/CIS ince filminin optiksel özellikleri.....	132
4.3.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optiksel özellikleri	134

4.3.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optiksel özellikleri	135
4.3.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri	137
4.3.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optiksel özellikleri	138
4.3.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri	140
4.3.13 Cam/ITO/CIGS İnce Filminin Optiksel Özellikleri	141
4.3.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optiksel özellikleri	143
4.3.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optiksel özellikleri.....	144
4.3.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri	146
4.3.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optiksel özellikleri	147
4.3.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri.....	149
4.4 Elektriksel Özellikler	150
4.4.1 Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	150
4.4.2 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	152
4.4.3 Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	154
4.4.4 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	155
4.4.5 Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri.....	157
4.4.6 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	159
4.4.7 Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	160
4.4.8 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri.....	161
4.4.9 Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri.....	163
4.4.10 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	165
4.4.11 Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri	166
4.4.12 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri.....	168
5. TARTIŞMA SONUÇ	170
KAYNAKLAR	184
ÖZGEÇMİŞ	194

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4. 1: InSe ve In ₂ O ₃ fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.....	52
Çizelge 4. 2: InSe, In ₆ Se ₇ ve In ₂ (SeO ₄) ₃ fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.....	53
Çizelge 4. 3: Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	54
Çizelge 4. 4: Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri. 55	
Çizelge 4. 5: Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri.....	56
Çizelge 4. 6: Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	57
Çizelge 4. 7: CuInSe ₂ , (Cu ₂ Se ₃) _x (In ₂ Se ₃) _{1-x} , In ₂ Se ₃ , CuSe ve InSe fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.	58
Çizelge 4. 8: Cu _{0,28} In _{1,72} Se _{2,72} , In ₂ O ₃ , (Cu ₂ Se) _x (In ₂ Se ₃) _{1-x} , CuO ve CuSe fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.	60
Çizelge 4. 9: Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri.....	61
Çizelge 4. 10: Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri.62	
Çizelge 4. 11: Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	63
Çizelge 4. 12: Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	64
Çizelge 4. 13: CuGa ₂ O ₁₄ Se ₄ , CuGa _{0,6} In _{2,4} Se ₅ , In ₂ O ₃ , CuIn ₃ Se ₅ , In ₄ Se ₃ , CuGa ₂ O ₄ , CuO fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.....	65
Çizelge 4. 14: CuGa _{0,6} In _{0,4} Se ₂ , CuGa _{0,6} In _{2,4} Se ₅ , InSe, In ₆ Se ₇ fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.	67
Çizelge 4. 15: Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri....	68
Çizelge 4. 16: Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	69
Çizelge 4. 17: Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri. .	70
Çizelge 4. 18: Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen coronene fazının 2θ° ve hkl değerleri.	71
Çizelge 5. 1: Üretilen filmlerin kalınlıkları.....	170
Çizelge 5. 2: Filmlerin AFM ve SEM parametreleri.....	174
Çizelge 5. 3: Filmlerin yasak enerji band aralıkları, yasak enerji band aralığı tipi ve görünür bölge sınırlarında geçirgenlik değerleri.	177
Çizelge 5. 4: Heteroeklemlerin diyot tipleri, sıfır (0) potansiyel altında karanlık ve ışıklı ortamda oluşturdıkları akım değerleri ve diyot parametreleri.	178
Çizelge 5. 5: Heteroeklemlerin karanlık ve ışıklı ortamda, ters ve düz beslemde I-V ölçümünden sergiledikleri davranışlar.....	179

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1: Üç boyutlu tetrahedron oluturan Si atomları	4
Şekil 2. 2: Yarıiletkenlerin band yapısı.....	5
Şekil 2. 3: Bir yarıiletkenin band yapısı.....	6
Şekil 2. 4: Doğrudan soğurma olayı.....	9
Şekil 2. 5: Dolaylı soğurma olayı.....	11
Şekil 2. 6: Yasak enerji aralığının soğurma yöntemi ile belirlenmesi	12
Şekil 2. 7: n ve p-tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesi ve taşıyıcı konsatrasyonu.....	14
Şekil 2. 8: Organik yarıiletkenlerin karbon atomlarının π orbitalleri ve π bağı ile birbirine tutulan bir konjuge π -elektron sistemi	17
Şekil 2. 9: Toz haldeki rubrene	18
Şekil 2. 10: a) Yapısal formül, b) Üç boyutlu resim (H atomları gösterilmemiştir).....	19
Şekil 2. 11: Coronene toz hali	21
Şekil 2. 12: Sol şekil coronene'in moleküler yapısının şematik gösterimi, sağ şekil coronene'in kristal yapısı.....	22
Şekil 2. 13: X-ışını difraksiyon şeması	30
Şekil 2. 14: SEM cihazının şematik gösterimi	31
Şekil 2. 15: Taramalı Tünelleme Mikroskopunun şematik gösterimi.....	32
Şekil 2. 16: Atomik kuvvet mikroskopunun şematik gösterimi.....	33
Şekil 2. 17: İğne-yay sisteminin elektron mikroskobu görüntüsü.....	34
Şekil 2. 18: Fiziksel buhar biriktirme yönteminin şematik gösterimi	39
Şekil 2. 19: Üç elektrotlu elektrokimyasal kaplama sisteminin şematik gösterimi	40
Şekil 3. 1: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi cihazı.....	43
Şekil 3. 2: Termal buharlaştırma ince film kaplama sistemi.....	44
Şekil 3. 3: Maskeleme işleminin şematik gösterimi.	45
Şekil 3. 4: GNR marka Europe model toz XRD cihazı	48
Şekil 3. 5: HİTACHI marka SU 1510 model SEM cihazı	48
Şekil 3. 6: NANOSURF marka C3000 model AFM cihazı	49
Şekil 3. 7: Thermo SCIENTIFIC marka Thermo Scientific Evolution Array model UV-VİS spektrometre cihazı	49
Şekil 3. 8: SCIENCETECH marka Solar Simulator AAA model güneş simülatörü cihazı	50
Şekil 4. 1: Filmlerin kalınlıklarının belirlenmesinin gösterimi.	51
Şekil 4. 2: Cam/ITO/InSe ince filminin XRD spektrumu.....	52
Şekil 4. 3: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin XRD spektrumu.	53
Şekil 4. 4: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin XRD spektrumu.	54
Şekil 4. 5: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.....	55
Şekil 4. 6: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin XRD spektrumu.....	56
Şekil 4. 7: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.	57
Şekil 4. 8: Cam/ITO/CIS ince filminin XRD spektrumu.....	58

Şekil 4. 9: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin XRD spektrumu.	59
Şekil 4. 10: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin XRD spektrumu.	60
Şekil 4. 11: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.	61
Şekil 4. 12: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin XRD spektrumu.	62
Şekil 4. 13: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.	63
Şekil 4. 14: Cam/ITO/CIGS ince filminin XRD spektrumu.	65
Şekil 4. 15: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin XRD spektrumu.	66
Şekil 4. 16: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin XRD spektrumu.....	67
Şekil 4. 17: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.	68
Şekil 4. 18: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin XRD spektrumu.	69
Şekil 4. 19: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.....	70
Şekil 4. 20: Cam/ITO/InSe ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	71
Şekil 4. 21: Cam/ITO/InSe ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	72
Şekil 4. 22: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.....	72
Şekil 4. 23: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.....	73
Şekil 4. 24: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü. 73	
Şekil 4. 25: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü. 74	
Şekil 4. 26: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	74
Şekil 4. 27: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	75
Şekil 4. 28: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	75
Şekil 4. 29: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	76
Şekil 4. 30: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	76
Şekil 4. 31: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	77
Şekil 4. 32: Cam/ITO/CIS ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	77
Şekil 4. 33: Cam/ITO/CIS ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	78
Şekil 4. 34: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	78
Şekil 4. 35: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	79
Şekil 4. 36: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü. . 79	
Şekil 4. 37: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü. . 80	
Şekil 4. 38: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	80
Şekil 4. 39: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	81
Şekil 4. 40: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	81
Şekil 4. 41: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	82

Şekil 4. 42: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	82
Şekil 4. 43: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	83
Şekil 4. 44: Cam/ITO/CIGS ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.....	83
Şekil 4. 45: Cam/ITO/CIGS ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.....	84
Şekil 4. 46: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	84
Şekil 4. 47: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	85
Şekil 4. 48: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	85
Şekil 4. 49: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	86
Şekil 4. 50: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	86
Şekil 4. 51: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	87
Şekil 4. 52: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	87
Şekil 4. 53: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	88
Şekil 4. 54: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	88
Şekil 4. 55: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.	89
Şekil 4. 56: Cam/ITO/InSe ince filminin elektron fotoğrafı.	89
Şekil 4. 57: Cam/ITO/InSe ince filminin EDS fotoğrafı.	90
Şekil 4. 58: Cam/ITO/InSe ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.....	90
Şekil 4. 59: Cam/ITO/InSe(tav) filminin elektron fotoğrafı.	91
Şekil 4. 60: Cam/ITO/InSe(tav) filminin EDS fotoğrafı.....	91
Şekil 4. 61: Cam/ITO/InSe(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.	91
Şekil 4. 62: Cam/ITO/CIS filminin elektron fotoğrafı.....	92
Şekil 4. 63: Cam/ITO/CIS filminin EDS fotoğrafı.	92
Şekil 4. 64: Cam/ITO/CIS ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.....	92
Şekil 4. 65: Cam/ITO/CIS(tav) filminin elektron fotoğrafı.	93
Şekil 4. 66: Cam/ITO/CIS(tav) filminin EDS fotoğrafı.....	93
Şekil 4. 67: Cam/ITO/CIS(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.	93
Şekil 4. 68: Cam/ITO/CIGS filminin elektron fotoğrafı.....	94
Şekil 4. 69: Cam/ITO/CIGS filminin EDS fotoğrafı.	94
Şekil 4. 70: Cam/ITO/CIGS ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.....	95
Şekil 4. 71: Cam/ITO/CIGS(tav) filminin elektron fotoğrafı.	95
Şekil 4. 72: Cam/ITO/CIGS(tav) filminin EDS fotoğrafı.....	96
Şekil 4. 73: Cam/ITO/CIGS(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.	96
Şekil 4. 74: Cam/ITO/InSe ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	97
Şekil 4. 75: Cam/ITO/InSe ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	97

Şekil 4. 76: Cam/ITO/InSe ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.....	98
Şekil 4. 77: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.....	98
Şekil 4. 78: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.....	99
Şekil 4. 79: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü. 99	
Şekil 4. 80: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.....	100
Şekil 4. 81: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.100	
Şekil 4. 82: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	101
Şekil 4. 83: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	101
Şekil 4. 84: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	102
Şekil 4. 85: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	102
Şekil 4. 86: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü. ...	103
Şekil 4. 87: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	103
Şekil 4. 88: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	104
Şekil 4. 89: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	104
Şekil 4. 90: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	105
Şekil 4. 91: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	105
Şekil 4. 92: Cam/ITO/CIS ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	106
Şekil 4. 93: Cam/ITO/CIS ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	106
Şekil 4. 94: Cam/ITO/CIS ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.....	107
Şekil 4. 95: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.....	107
Şekil 4. 96: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	108
Şekil 4. 97: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.108	
Şekil 4. 98: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.....	109
Şekil 4. 99: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü. 109	
Şekil 4. 100: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	110
Şekil 4. 101: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	110
Şekil 4. 102: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	111
Şekil 4. 103: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	111
Şekil 4. 104: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü. ..	112
Şekil 4. 105: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	112

Şekil 4. 106: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	113
Şekil 4. 107: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	113
Şekil 4. 108: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	114
Şekil 4. 109: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	114
Şekil 4. 110: Cam/ITO/CIGS ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	115
Şekil 4. 111: Cam/ITO/CIGS ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.....	115
Şekil 4. 112: Cam/ITO/CIGS ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü... 116	
Şekil 4. 113: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.....	116
Şekil 4. 114: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü. .	117
Şekil 4. 115: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	117
Şekil 4. 116: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü. ..	118
Şekil 4. 117: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	118
Şekil 4. 118: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	119
Şekil 4. 119: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	119
Şekil 4. 120: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	120
Şekil 4. 121: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	120
Şekil 4. 122: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü. 121	
Şekil 4. 123: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	121
Şekil 4. 124: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	122
Şekil 4. 125: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.	122
Şekil 4. 126: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.	123
Şekil 4. 127: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.	123
Şekil 4. 128: Cam/ITO/InSe ince filminin optik soğurma grafiği.	124
Şekil 4. 129: Cam/ITO/InSe ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	124
Şekil 4. 130: Cam/ITO/InSe ince filminin yasak enerji grafiği.	125
Şekil 4. 131: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.	125
Şekil 4. 132: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optik geçirgenlik grafiği.....	126
Şekil 4. 133: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin yasak enerji grafiği.....	126
Şekil 4. 134: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	127
Şekil 4. 135: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	127

Şekil 4. 136: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	128
Şekil 4. 137: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	128
Şekil 4. 138: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	129
Şekil 4. 139: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	129
Şekil 4. 140: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	130
Şekil 4. 141: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	130
Şekil 4. 142: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	131
Şekil 4. 143: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	131
Şekil 4. 144: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	132
Şekil 4. 145: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	132
Şekil 4. 146: Cam/ITO/CIS ince filminin optik soğurma grafiği.	133
Şekil 4. 147: Cam/ITO/CIS ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	133
Şekil 4. 148: Cam/ITO/CIS ince filminin yasak enerji grafiği.	134
Şekil 4. 149: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.	134
Şekil 4. 150: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	135
Şekil 4. 151: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin yasak enerji grafiği.	135
Şekil 4. 152: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	136
Şekil 4. 153: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	136
Şekil 4. 154: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	137
Şekil 4. 155: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	137
Şekil 4. 156: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	138
Şekil 4. 157: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	138
Şekil 4. 158: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	139
Şekil 4. 159: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	139
Şekil 4. 160: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	140
Şekil 4. 161: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	140
Şekil 4. 162: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	141
Şekil 4. 163: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	141
Şekil 4. 164: Cam/ITO/CIGS ince filminin optik soğurma grafiği.	142
Şekil 4. 165: Cam/ITO/CIGS ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	142
Şekil 4. 166: Cam/ITO/CIGS ince filminin yasak enerji grafiği.	143
Şekil 4. 167: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.	143
Şekil 4. 168: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	144
Şekil 4. 169: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin yasak enerji grafiği.	144
Şekil 4. 170: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	145
Şekil 4. 171: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	145
Şekil 4. 172: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	146
Şekil 4. 173: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.	146
Şekil 4. 174: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	147
Şekil 4. 175: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.	147
Şekil 4. 176: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	148
Şekil 4. 177: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	148
Şekil 4. 178: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	149
Şekil 4. 179: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.	149

Şekil 4. 180: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.	150
Şekil 4. 181: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.	150
Şekil 4. 182: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	151
Şekil 4. 183: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	151
Şekil 4. 184: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	152
Şekil 4. 185: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	152
Şekil 4. 186: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	153
Şekil 4. 187: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	153
Şekil 4. 188: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	154
Şekil 4. 189: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	154
Şekil 4. 190: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	155
Şekil 4. 191: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	156
Şekil 4. 192: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	156
Şekil 4. 193: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği. ...	157
Şekil 4. 194: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	157
Şekil 4. 195: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	158
Şekil 4. 196: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	158
Şekil 4. 197: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	159
Şekil 4. 198: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	159
Şekil 4. 199: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	160
Şekil 4. 200: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	160
Şekil 4. 201: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	161
Şekil 4. 202: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	162
Şekil 4. 203: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	162
Şekil 4. 204: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği. ...	163
Şekil 4. 205: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	163
Şekil 4. 206: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	164
Şekil 4. 207: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	165
Şekil 4. 208: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	165
Şekil 4. 209: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	166
Şekil 4. 210: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	167
Şekil 4. 211: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	167
Şekil 4. 212: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.	168
Şekil 4. 213: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.	168
Şekil 4. 214: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.	169

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ITO	: İndiyum kalay oksit
CIGS	: Bakır indiyum galyum selenit
CIS	: Bakır indiyum selenit
InSe	: İndiyum selenit
NDR	: Negatif diferansiyel direnç
LDR	: Işığa bağımlı direnç
PAH	: Çok halkalı aromatik hidrokarbon
UV	: Ultraviyole
OLED	: Organik ışık yayan diyet
OFED	: Organik alan etkili diyet
Ω	: Ohm
fcc	: Yüzey merkezli kübik
K	: Kelvin
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_i	: İletim bandı enerjisi
E_d	: Valans bandı enerjisi
m^*_e	: Elektronun etkin kütlesi
m^*_b	: Boşluğun etkin kütlesi
$\hbar$	: İndirgenmiř Planck sabiti
h	: Planck sabiti
n	: Enerji düzeyleri konsantrasyonu
eV	: Eletrovolt
ν	: Frekans
c	: Işık hızı
λ_g	: Gelen ışığın dalga boyu
E_{ilk}	: İlk durum enerjisi
E_{son}	: Son durum enerjisi
k	: Dalga vektörü
α	: Soğurma katsayısı
E_p	: Fonon enerjisi
E_f	: Fermi enerjisi

V	: Potansiyel fark
L	: Uzunluk
E	: Elektrik alan
J	: Akım yoğunluğu
μ	: Mobilite
ρ	: Özdirenç
σ	: Öziletkenlik
OTFT	: Organik ince film transistör
AC	: Alternatif akım
PV	: Photovoltaik
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
V_{oc}	: Açık devre voltajı
J_{sc}	: Kısa devre akım yoğunluğu
LED	: Işık yayan diyot
E_{ext}	: Dış elektrik alan
Å	: Angstrom
M-CBD	: Modifiye edilmiş kimyasal banyo depolama
M	: Molarite
ECP	: Elektriksel iletken polimer
ED	: Elektro depolama
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
A	: Soğurma
I₀	: Gönderilen ışığın şiddeti
SHE	: Standart hidrojen elektrot
(tav)	: Tavlanmış
hkl	: Miller indisleri

ÖZET

Doktora Tezi

ITO CAM ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE, CIGS/RUBRENE, InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE HETEROEKLEMLERİN YAPISAL, OPTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Fatih ÜNAL

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

194+XIX Sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Tekin İZGİ

Bu çalışmada InSe, CIS ve CIGS ince filmleri elektrokimyasal kaplama yöntemi ile cam/ITO alt tabanı üzerine kaplandı. Elde edilen filmler iki gruba ayrıldı ve bir grubu tavlandı. Hem tavlanmamış hem de tavlanmış filmlerin yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri ayrı ayrı incelendi. Daha sonra tavlanmış ve tavlanmamış cam/ITO/InSe, cam/ITO/CIS, cam/ITO/CIGS ince filmlerinin üzerine ayrı ayrı rubrene ($C_{42}H_{28}$) ve coronene ($C_{24}H_{12}$) organik yarıiletken bileşikleri PVD yöntemi ile kaplandı. Elde edilen heteroeklemlerin yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri ve bu heteroeklemlere In (indiyum) kontaklar alarak karanlık ve ışıklı ortamlarda elektriksel özellikleri incelendi. XRD analizinden cam/ITO/InSe ince filminin InSe ve In_2O_3 fazlarını tavlandıktan sonra InSe, In_6Se_7 ve $In_2(SeO_4)_3$ fazlarını içerdiği, cam/ITO/CIS ince filminin $CuInSe_2$, $(Cu_2Se)_x(In_2Se_3)_{1-x}$, In_2Se_3 , CuSe ve InSe fazlarını tavlandıktan sonra $Cu_{0,28}In_{1,72}Se_{2,72}$, In_2O_3 , $(Cu_2Se_3)_x(In_2Se_3)_{1-x}$, CuO, CuSe fazlarını içerdiği, cam/ITO/CIGS ince filminin $CuGa_2O_{14}Se_4$, $CuGa_{0,6}In_{2,4}Se_5$, In_2O_3 , $CuIn_3Se_5$, In_4Se_3 , $CuGa_2O_4$, CuO fazlarını tavlandıktan sonra $CuGa_{0,6}In_{0,4}Se_2$, $CuGa_{0,6}In_{2,4}Se_5$, InSe, In_6Se_7 fazlarını içerdiği gözlemlendi. Filmlerin yüzey morfolojileri AFM, SEM ve EDS ile ayrı ayrı incelendi. UV-Vis analizinden ince filmlerin yasak enerji aralıkları ve 400 ve 700 nm de geçirgenliklik değerleri belirlendi. Karanlık ve ışıklı ortamlarda gerçekleştirilen I-V karakterizasyonunda heteroeklemlerin tamamının ışığa duyarlı olduğu ve bazı filmlerin doğrultucu karakteristik gösterdiği gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: InSe1, CIS2, CIGS3, ITO4, PVD5, AFM6, SEM7, XRD8

ABSTRACT

Phd. Thesis

DETERMINATION OF THE STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTRICAL
CHARACTERISTICS OF InSe/RUBRENE, CIS/RUBRENE, CIGS/RUBRENE,
InSe/CORONENE, CIS/CORONENE, CIGS/CORONENE HETEROJOINTS GROWTH
ON ITO GLASS

Fatih ÜNAL

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Physics

194+XIX Page

2020

Supervisor: Prof. Dr. Tekin İZGİ

In this study, we coated InSe, CIS and CIGS thin films on the glass/ITO substrate by electrochemical coating method. We divided the thin films obtained into two groups and annealed one groups. We separately examined the structural, surface and optical properties of both non-annealed and annealed thin films. Later we separately coated rubrene and coronene organic semiconductor compounds on the annealed and non-annealed glass/ITO/InSe, glass/ITO/CIS and glass/ITO/CIGS thin films by PVD method. We investigated the structural, surface and optical properties of the heterojoints obtained and the electrical properties in dark and light environments by taking In (indium) contacts to these heterojoints. From the XRD analysis, it was seen that InSe thin film contains InSe and In_2O_3 phases, annealed InSe thin film contains InSe, In_6Se_7 ve $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ phases, CIS thin film contains CuInSe_2 , $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$, In_2Se_3 , CuSe and InSe, annealed CIS thin film contains $\text{Cu}_{0,28}\text{In}_{1,72}\text{Se}_{2,72}$, In_2O_3 , $(\text{Cu}_2\text{Se}_3)_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$, CuO and CuSe phases, CIGS thin film contains $\text{CuGa}_2\text{O}_{14}\text{Se}_4$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, In_2O_3 , CuIn_3Se_5 , In_4Se_3 , CuGa_2O_4 and CuO phases, annealed CIGS thin film $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, InSe, In_6Se_7 . Surface morphology of films were examined with AFM, SEM and EDS. From the UV-Vis analysis, the band gap values and transmittance values at 400 nm-700 nm of thin films were determined. In I-V characterization performed in dark and light environments, it was observed that all of the heterojoints were light sensitive and some films showed rectifier characteristics.

Keywords: InSe1, CIS2, CIGS3, ITO4, PVD5, AFM6, SEM7, XRD8

1.GİRİŞ

İnsanoğlunun yarıiletkenlerle tanışması 19. yy.ın ortalarına dayanmaktadır. Uygulama alanlarındaki ihtiyaçların artmasıyla orantılı bir şekilde yarıiletken fiziği de gün geçtikçe gelişmektedir. Yarıiletkenler teknoloji alanının hemen hemen her yerinde bilhassa enerji sektöründe, uzay bilimleri alanlarında ve sağlık sektöründe kullanılmaktadır [1]. Yarıiletkenler, iletkenlik bakımından yalıtkanlar ve iletkenler arasında yer alan malzemelerdir. Yarıiletkenlerde iletim safsızlık atomlarının miktarına, sıcaklığa, manyetik alana ve ışığa bağlıdır. Bu özelliklerinden dolayı yarıiletkenler elektronik devre elemanlarında kullanımları tercih edilir [2]. Bugün elektronik devre elemanlarının neredeyse tamamında yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin boyutlarının küçük, kullanım ömürlerinin uzun ve verimli olmaları gibi özelliklerinden dolayı elektronik devre elemanlarında kullanımları oldukça yaygındır [2]. Yarıiletkenlerin devre elemanlarında kullanılması, katıhal fiziğinin 20.yüzyıl teknolojisine yaptığı en önemli katkılarından biridir [3].

Günümüzde kullanılan birçok yarıiletken cihazın işleyişi p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilerek oluşturulan eklemler üzerine kuruludur. P-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin uygun şartlarda bir araya getirilerek elde edilen eklemler; güneş pili, diyot, dedektör, sensör ve transistör gibi elektronik devre elemanlarının temelini oluştururlar. Güneş pilleri güneşten gelen ışınları doğrudan elektrik enerjisine çeviren p-n eklemleridir [1]. Diyotlar yalnızca bir yönde akım geçiren p-n eklemleridir. Diğer bir ifade ile bir yöndeki dirençleri ihmal edilebilecek kadar küçük, diğer yöndeki dirençleri oldukça büyük olan devre elemanlarıdır. Kullanım alanları sensör, dedektör, doğrultucu, limitör, modülatör, anahtar vb.dir [4].

Periyodik tablonun IV. sütununda bulunan C, Si, Ge gibi elementler yarıiletken özellik gösterirler. Yarıiletkenler doğada saf bir şekilde bulunmasının yanı sıra uygun elementlerin farklı yöntemlerle reaksiyona sokulması sonucunda bileşik şeklinde de elde edilebilirler. Bilinen en yaygın bileşik yarıiletkenler III-V, III-VI grup bileşikleridir. Kullanılan yöntemler doğrultusunda bu yarıiletken bileşikler bulk malzeme şeklinde sentezlenebilirken kalınlıkları birkaç nanometreden birkaç mikrometre seviyelerinde olan ince film formunda da üretilebilirler. İnsanoğlunun yarıiletkenlerle tanışmasından bu yana üretilen ince filmler

bilimin ve teknolojinin bugünkü seviyesine gelmesinde önemli katkılar sağlamıştır. Bu gelişmeye paralel olarak farklı ince film üretme yöntemleri de ortaya çıkmıştır. Gelişen teknolojiyle beraber ince filmlerin kullanım alanları da gitgide genişlemektedir. Bu alanlarda kullanılan diyotlar, transistörler, sensörler ve bu aygıtlara benzer cihazlar yarıiletkenlerin ince tabakalar halinde sentezlenmesiyle elde edilmiştir. Böylece, bilgisayarlardan cep telefonlarına, medikal cihazlardan uzay teknolojilerine kadar günlük hayatımızda sıkça kullandığımız cihazların yapımında yarıiletken ince filmler önemli bir yere sahip olmuşlardır [5, 6].

CuInGaSe (CIGS), CuInSe (CIS) ve InSe ince filmleri iyi bir dönüştürücü, geniş bir optiksel soğurma katsayısı ve direkt ya da indirekt bant aralığına sahip olmalarından dolayı güneş pili üretiminde oldukça verimlidirler. Ayrıca herhangi bir bozulma söz konusu olmaksızın uzun süre kararlılıklarını muhafaza ederler. Bu ince filmler güneş pilleri için geleceği parlak soğurucu materyallerdir. Bu yüzden bu hücreler yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminde iyi tip hücreler olarak adlandırılmaktadır [1, 7-9].

Büyük mol kütleleri ile istikrarlı olan çok halkalı aromatik hidrokarbonlar (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) farklı disiplinler arasında fazlasıyla dikkat çekmekte olup, organik yarıiletken materyallere olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Farklı optoelektronik özelliklere sahip bu moleküllerden bazıları fotovoltaiik hücre, Shottky diyot, ışık yayan diyot, ince film transistör gibi yüksek performanslı organik-elektronik devre elemanlarının uygulamalarında kullanılmaktadır [10].

Süper benzen olarak bilinen, kimyasal formülü $C_{24}H_{12}$ olan coronene altılı benzen halkası içeren çok halkalı aromatik hidrokarbonlu bir bileşiktir. Toluene, dichlorometan ve yaygın çözücülerde çözünen sarı renk bir maddedir. Bu çözeltiler UV ışık altında mavi renk ışık yayarlar. Coronenin elektriksel ve optiksel özelliklerini araştıran birçok çalışma yayınlanmıştır [11].

Işıklı panellerde sarı ışık kaynağı ve kemilüminesansta hassaslaştırıcı olarak kullanılan rubrene kırmızı renkli çok halkalı hidrokarbonlu bir bileşiktir. Organik bir yarıiletken ve kimyasal formülü $C_{42}H_{28}$ olan rubrenin temel uygulama alanları OLED (organik ışık yayan diyot) ve OFED (organik alan etkili transistör)'dir [12].

Bu çalışmada cam/ITO/InSe/Rubrene, cam/ITO/CIS/Rubrene, cam/ITO/CIGS/Rubrene, cam/ITO/InSe/coronene, cam/ITO/CIS/Coronene, cam/ITO/CIGS/Coronene heteroeklemlerin düşük maliyet ile sentezlenmesi ve bu heteroeklemlerin yapısal, optik ve

elektriksel özelliklerinin incelenmesiyle diyot (fotodiyot, tünel diyot vb.), foto-sensör ve güneş pilleri gibi elektronik devre elemanlarında kullanılan malzemelere bir alternatif olarak sunulması amaçlanmıştır.



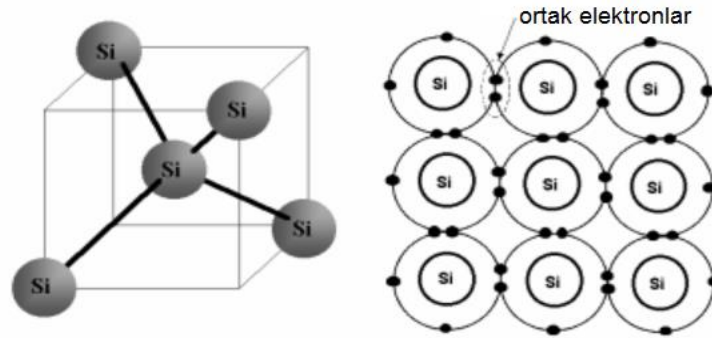
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Yarıiletkenler

Yarıiletkenler katıların en ilginç ve önemli sınıfını oluşturur. Bunlar metallere yalıtkanlara uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir olaylar zincirini sergilerler ve geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Yarıiletkenlerin özdirençleri oda sıcaklığında 10^{-2} ile $10^9 \Omega\text{cm}$ aralığındadır. Bu aralık; $10^{-6} \Omega\text{cm}$ den daha küçük özdirençlere sahip olan iyi iletkenler ile özdirençleri 10^{14} ile $10^{20} \Omega\text{cm}$ aralığında olan yalıtkanlar arasındaki bölgeye düşer. Yarıiletken malzemelerin saf ve kusursuz kristalleri, mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkandır. Tanıtıcı yarıiletken olma özelliği; termal uyarı sonucunda, safsızlık atomları ve kristal örgü kusurları bulunması halinde veya kimyasal düzende meydana gelen değişiklikler sonucu ortaya çıkar. Bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık yükseldiğinde, bir yarıiletkenin özdirencinin azalması onun en belirgin özelliğidir. Bu özellik; özdirenci esas alarak fonon saçılmasından ileri gelen, metallerdeki durumdan tamamen farklıdır. Yarıiletkenlerdeki yabancı madde oranı arttıkça öz direnç küçülür metallerde ise bunun tam tersi saflık arttıkça özdirenç küçülür [13].

2.1.1 Yarıiletkenlerin yapısal özellikleri

Katkısız yarıiletkenlerin hepsi elmas yapıda kristalleşir. Bu yapı aynı özelliklere sahip iki atomun meydana getirdiği bazlı bir fcc yapıdır. Bu yapıdaki her atom tetrahedron (düzgün dört yüzlü) oluşturacak şekilde yerleşen dört atomla çevrilidir. Üç boyutlu tetrahedron oluşturan Si atomları ile bu atomlar arasındaki kovalent bağlar şekil 2.1’de gösterilmektedir. Aradaki bağlar iki atomu birleştiren doğrultu boyunca ve zıt spinli iki elektron tarafından oluşturulur. Her bir Si atomu bu bağa bir elektron katkıda bulunur ve diğer IV. grup elementlerinin hepsi için bu ifadeler geçerlidir.

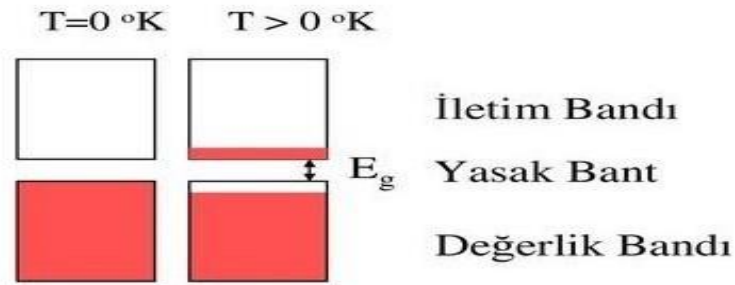


Şekil 2. 1: Üç boyutlu tetrahedron oluşturan Si atomları [14].

GaAs, InSb, GaSb, InAs gibi bileşikleride içine alan III-V grubu bileşiklerde yarıiletkenlerin önemli bir sınıfını oluştururlar. Bu bileşikler ZnS yapısında kristalleşirler ve bu yapı bazı oluşturan iki farklı atom dışında elmas yapının aynısıdır. Yarıiletkenlerin bir başka grup bileşikleri II-VI grup bileşikleridir ve CdS, ZnS, CdSe, CdTe bu bileşiklere örnektir. Bu bileşiklerde ZnS gibi kristalleşirler. Atomlar esas olarak kovalent bağ özelliği gösterir. Yük taşınımı III-V grubuna göre daha büyüktür. Son önemli grup IV-VI grubudur. PbTe, PbSe bu grup bileşikleridir [13].

2.1.2 Yarıiletkenlerin band yapısı

Yarıiletkenler mutlak sıfırda ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$) tamamen dolu değerlik bandı ve değerlik bandından (valans bandı) dar bir enerji bandı ile ayrılmış tamamen boş iletim bandına sahip kristallerdir. Aşağıdaki şekil 2.2’de bu bandın yapısı gösterilmiştir.

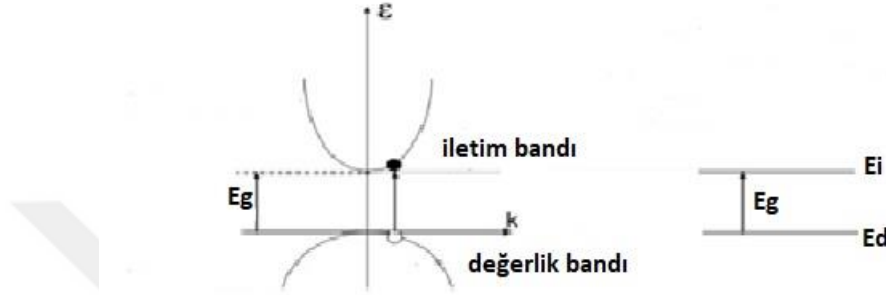


Şekil 2. 2: Yarıiletkenlerin band yapısı [15].

Mutlak sıfırda yarıiletkenler mükemmel yalıtkanlardır çünkü iletim bandı tamamen boştur. Ancak mutlak sıfırdan daha yüksek sıcaklıklarda bazı elektronlar yasak enerji aralığından daha yüksek enerji kazandıklarında değerlik bandından iletim bandına çıkarlar. İletkenlik bandına çıkan elektronlar değerlik bandında bıraktıkları pozitif yüklü kabul edilen boşluklarla beraber elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Elektronların ve boşlukların sayısı artan sıcaklıkla doğru orantılı şekilde artacağı için sıcaklıkla yarıiletkenlerin iletkenliği artacaktır. Değerlik bandından termal yolla uyarılarak kopan ve iletimlik bandına geçen elektron artık serbest bir elektrondur ve kristalde yük taşıyıcısı rolü üstlenir. Değerlik bandında kovalent bağla örgüye bağlı olan elektron kopunca bu durum kristalde bir kusur meydana getirecektir. Bu kusur başka bir elektronla doldurulabilir fakat boştur. Bu boşluğa hol ya da deşik adı verilir. Kristal içerisinde hem elektronlar hem de boşluklar hareket edebilme kabiliyetine sahiptirler ve bu hareket rastgeledir. Bazen değerlik bandında kovalent bağlarda oluşan elektron boşluğunu örgüdeki başka bir elektron doldurabilir. Böylece

boşluğu dolduran elektronun yeri de boşalmış olur ve elektronla zıt yönlü hareket meydana gelir [16].

Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri metallere nazaran daha küçüktür fakat işlevsellik bakımından pratik amaçlara yetecek kadar da büyüktür. Band uçları, birinci Brillouin bölgesinin merkezinde olan bir yarıiletkenin band yapısı aşağıdaki şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 3: Bir yarıiletkenin band yapısı [17].

İletim elektronlarının çoğu, iletim bandının tabanı civarında bulunacağından, bu bandı bu bölgede küresel yapıda almak mümkündür. Bu yapıldığında şekilde de görüldüğü gibi iletim bandının enerjisi;

$$E_i(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesidir ve enerjinin sıfırı değerlik bandının tepesinde seçilmiştir. Değerlik bandının enerjisi ise;

$$E_d(k) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_b^*} \quad (2.2)$$

Burada m_b^* boşluğun etkin kütlesidir. Değerlik bandının şeklinin ters dönmüş parabol olması yüzünden bu bandın tepesindeki bir elektronun etkin kütlesi eksi işaretli yani $m_e^* = -m_b^*$ dir fakat boşluğun etkin kütlesi artı işaretlidir.

Yarıiletkenlerin E_g , m_e^* ve m_b^* değerleri band yapısıyla ilgili önemli parametrelerdir ve her bir yarıiletken için farklılık gösterir. E_g yasak enerji aralığı sıcaklığın artmasıyla değişmektedir fakat bu değişim çok fazla değildir. Kristalin ısınması sonucu örgü sabitinin değişmesi bu değişimin temel sebebidir. E_g aynı zaman da basınç, katkı atomlarının miktarı, numunenin kalınlığı [18] ile de değişmektedir [13].

2.1.3 Asal yarıiletkenler

Bir yarıiletkenin serbest taşıyıcılarının çoğu yarıiletkenin kendi atomlarından kaynaklanıyorsa bu tür yarıiletkenlere asal yarıiletkenler denir. Bir başka deyişle kristal içerisinde elektronlar ve boşluklar sadece termal uyarılma ile elde ediliyorsa bu yarıiletkenlere asal yarıiletken denir [16].

Asal yarıiletkenler içinde safsızlık atomları bulunmayan yarıiletkenlerdir. Mutlak sıfır sıcaklığında hiç bir yük taşıyıcısı yoktur. Isı enerjisi alan değerlik elektronları iletim bandına çıkarlar. Böylece kristalde yük taşıyıcıları meydana gelir ve iletkenlik oluşur. Taşıyıcılar çiftler halinde olduğundan değerlik bandındaki boşluk sayısı ile iletim bandındaki elektron sayısı birbirine eşit olur.

Elektronun iletim bandına çıkma olasılığı ya da bu bandda bulunma olasılığı Boltzman faktörü ile tanımlanır. Boltzman faktörü;

$$\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = \frac{n}{N_i} \quad (2.3)$$

ile verilir. Burada $E_g = E_i - E_d$, k =Boltzman sabiti, T =sıcaklık, n =iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu, N_i =iletkenlik bandında valans elektronlarını kabul edebilecek enerji düzeyleri konsantrasyonu ve kT değeri elektronun ortalama termal enerjisidir.

Oda sıcaklığında 300 °K'de $kT=0,0258$ eV'tur. Denklemdaki 2 sayısı elektron ve boşlukların çift olarak oluşmasından dolayıdır.

Belirli bir kristal için E_g sadece T sıcaklığına bağlıdır yani sıcaklık arttıkça elektronun iletkenlik bandında bulunma olasılığı da artar.

Matematiksel olarak bakıldığında taşıyıcı sayısını artırmak için sıcaklığın yükseltilmesi bir yol olarak düşünülebilir fakat pratik değildir. Yarıiletkenlerdeki taşıyıcı konsantrasyonunu artırmak yani iletkenliği artırmak için kristale uygun safsızlık atomları eklenir. Böylece oluşan katkı yarıiletkenlerde çok daha yüksek oranlarda taşıyıcı sayısı sağlanmış olur [19].

2.1.4 Katkılı yarıiletkenler

Asal bir yarıiletkenin iletkenliği, dışardan safsızlık atomlarının katkılanması ile değiştirebilir. Yarıiletkene kontrollü bir şekilde doplanan atomlara katkı atomları adı verilir ve doplama işleminden sonra asal yarıiletken katkı yarıiletkene dönüşür.

2.1.4.1 n ve p-tipi yarıiletkenler

İletkenliklerinin kontrollü yani istenilen şekilde değiştirilebiliyor olması yarıiletkenleri teknoloji alanında yaygın bir şekilde kullanılmasının nedenlerindendir. Katkılı yarıiletkenler asal bir yarıiletkenle kıyaslandığında çok daha yüksek iletkenliğe sahiptirler ve bu iletkenlik katkı atomlarının yoğunluğu ile değiştirilebilir ve kontrol edilebilir. İletkenliğe katkı, elektronlar ile sağlanıyorsa bu yarıiletken n-tipi yarıiletken, boşluklar ile sağlanıyor ise p-tipi yarıiletken adı verilir. Bu durumda n-tipi yarıiletkenlerde taşıyıcı rolü elektronlar üstlenirken p-tipi yarıiletkenlerde bu rolü boşluklar yani boşluklar üstlenir. N-tipi yarıiletkenlerde azınlık taşıyıcıları boşluklarken, p-tipi yarıiletkenlerde azınlık taşıyıcıları elektronlardır.

Eğer yarıiletken IV. grup elementlerinden (Ge, Si) ise n-tipi yarıiletken elde etmek için katkı atomları V. grup elementlerinden (As, P) seçilmelidir. Katkı olarak kullanılan V. grup elementleri verici yani donör atomu olarak adlandırılır. Çünkü katkılama sonrası boşta kalan bir elektron serbest hale gelir ve elektron kaynağı olarak davranır. P-tipi yarıiletken elde etmek için IV. grup elementlerine III. grup elementlerinden (B, Ga) katkı yapılır. Bu katkı atomuna alıcı yani akseptör atomu denir çünkü yarıiletkenin valans bandından bir elektron alır ve valans bandında bir boşluk oluşmasını sağlar [20].

2.1.5 Yarıiletkenlerin optik özellikleri

Bulk malzemelerin ve ince filmlerin optik özellikleri optoelektronik uygulamalarda oldukça önemlidir. Bir kristalin üzerine foton gönderildiğinde kristaldeki elektronlar ile gönderilen foton arasında bir takım etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşimler soğurma, yansıma ve geçirme şeklinde gerçekleşir. Bu olayların analizi bize kristal hakkında önemli bilgiler verir [21]. Valans bandındaki elektronlar termal yolla uyarılıp iletkenlik bandına geçmesi gibi optik olarak uyarılmayla da bu işlem gerçekleşebilir. Bu işlemin gerçekleşebilmesi için en temel şart kristal üzerine gelen fotonun enerjisinin yasak enerji aralığına eşit ya da bu aralıktan büyük olmasıdır [22]. Yarıiletkenlerin band yapılarının belirlenmesinde optik soğurma yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Optik soğurma yöntemi ile kristalin yasak enerji aralığı ve band yapısı hakkında bilgi edinilir. Soğurma, bir kristal üzerine gelen fotonun, kristalin elektriksel yükleri ile etkileşimi sonucu enerji kaybına uğramasıdır. Kaybolan enerji, kristal içerisindeki düşük enerji seviyesindeki elektronların daha yüksek enerji seviyesine geçmesini sağlar yani numune üzerine gelen foton elektronları uyarır [23].

2.1.5.1 Soğurma olayı

Yarıiletken malzemeye gelen fotonlarla maddenin atomlarının elektronlarının etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji aktarımı temel soğurma olayıdır. Soğurma olayı incelendiğinde, valans bandı birçok elektrona sahiptir ve iletim bandı da elektronların uyarılabileceği birçok boş seviyeye sahiptir. Bu durumda fotonun soğurulma ihtimali yüksektir [24].

Gelen fotonun frekansı ν ise;

$$\nu \geq E_g/h \quad (2.4)$$

gelen fotonun dalga boyu λ_g ise;

$$\lambda_g \leq \frac{hc}{E_g} \quad (2.5)$$

şartlarının sağlanması durumunda soğurma işlemi gerçekleşmektedir. Burada E_g yasak enerji aralığı, h planck sabiti, λ_g gelen fotonun dalga boyu ve c ışık hızıdır.

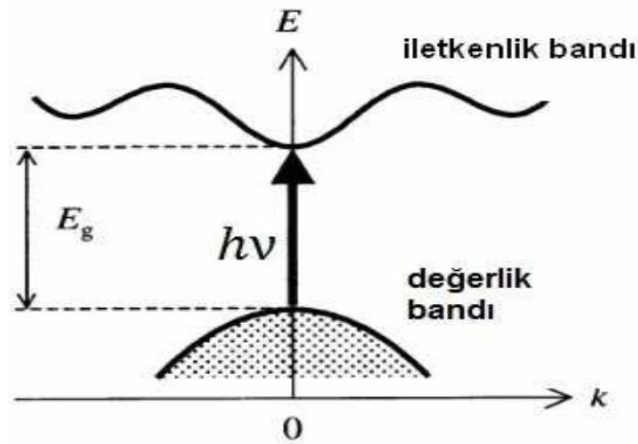
Bir yarıiletkenin temel soğurma sınırında iki tür geçiş vardır bunlar doğrudan soğurma ve dolaylı soğurmadır.

2.1.5.1.1 Doğrudan ve dolaylı soğurma

İletkenlik bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu enerji momentum uzayında aynı k değerine sahip ise meydana gelen soğurma doğrudan soğurmadır [22]. Sürekli optik soğurma bölgesinin frekansı ν ise band aralığı;

$$E_g = h\nu \quad (2.6)$$

ile belirlenir. Doğrudan soğurma olayında kristal bir foton soğurduğunda serbest bir elektron ve boşluk meydana gelir [25]. Şekil 2.4'te doğrudan soğurma olayı gösterilmiştir.



Şekil 2. 4: Doğrudan soğurma olayı [26].

İlk durum enerjisi E_{ilk} , son durum enerjisi E_{son} olan bir yarıiletkende $h\nu$ enerjili bir foton soğrulduğunda enerji bağıntısı;

$$E_{son} = E_{ilk} + h\nu \quad (2.7)$$

ile verilir.

Parabolik bandlarda;

$$E_{son} - E_g = \frac{h^2 k^2}{2m_e^*} = E_{ilk} \quad (2.8)$$

olur. Burada m_e^* elektronun, m_b^* boşluğun etkin kütlesi olmak üzere denklemin düzenlenmiş hali;

$$h\nu - E_g = \frac{h^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_b^*} \right) \quad (2.9)$$

olur. Doğrudan geçişlerde elektron boşluk etkileşimleri ve eksiton oluşumu göz ardı edilirse soğurma katsayısı α elektronun bandlardaki yoğunluğuna ve gelen fotonun enerjisine bağlıdır. Doğrudan band geçişine sahip bir yarıiletkende soğurma katsayısı α teorik olarak;

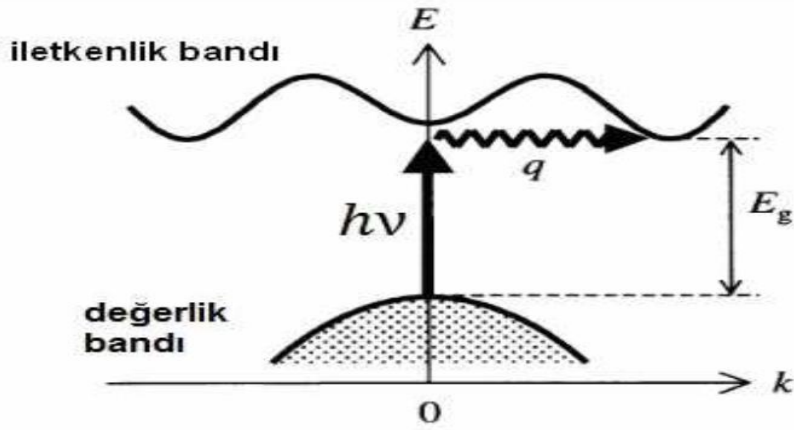
$$\alpha(h\nu) = A^* (h\nu - E_g)^n \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Burada A^* değeri;

$$A^* \approx \frac{q^2 2 \left(\frac{m_b^* m_e^*}{m_b^* + m_e^*} \right)}{nch^2 m_e^*} \quad (2.11)$$

ile ifade edilir. Burada n değeri bir sabittir ve izinli durumlarda $1/2$, yasaklı durumlarda $3/2$ değerini alır.

Dolaylı soğurma enerji momentum uzayında bir yarıiletkenin iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı k değerinde değilse meydana gelen soğurma olayıdır. Burada minimum enerji aralığında direkt bir foton geçişi dalga vektörü korunum şartını sağlamaz. Elektron foton soğurarak valans bandından iletkenlik bandına geçerken enerji korunumunun sağlanabilmesi için ya bir fonon salınması ya da soğrulması gerekir. Aşağıdaki şekil 2.5'te dolaylı soğurma olayı gösterilmiştir.



Şekil 2. 5: Dolaylı soğurma olayı [26].

Fonon salınımı gerçekleştiğinde;

$$h\nu = E_{\text{son}} - E_{\text{ilk}} + E_p \quad (2.12)$$

fonon soğrulması gerçekleştiğinde ise;

$$h\nu = E_{\text{son}} - E_{\text{ilk}} - E_p \quad (2.13)$$

burada E_p fononun enerjisidir.

Fonon soğrulmalı geçişlerde $h\nu > (E_g - E_p)$ için soğurma katsayısı;

$$\alpha_\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp(E_p/kT) - 1} \quad (2.14)$$

denklemleri ile verilir.

Fonon salınımlı geçişlerde ise;

$$\alpha_\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp(-E_p/kT)} \quad (2.15)$$

dir.

Fonon soğrulması ve salınımı aynı anda gerçekleşiyor ise α ile ν arasındaki bağıntı;

$$\alpha\nu = \alpha_\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp(E_p/kT) - 1} + \alpha_\alpha(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp(-E_p/kT)} \quad (2.16)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada n dolaylı band geçişli bir yarıiletken için 2, yasaklı geçişler için 3 değerini alan bir sabittir [22, 27].

2.1.5.2 Yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının belirlenmesi

Temel soğurma spektrumu yasak enerji band aralığının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Soğurma katsayısı ile yasak enerji band arasındaki bağıntı denklem 2.17’de verilmektedir. Bu denklem;

$$\alpha(h\nu) \approx (h\nu - E_g)^n \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu yöntemde $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}}$ ‘nin $h\nu$ ’ye göre grafiği şekil 2.6’daki gibi çizilmektedir. Grafiğin lineer olduğu kısma karşılık gelen doğrunun $h\nu$ ekseninin kestiği noktanın enerji değeri o materyalin yasak enerji band aralığını vermektedir.

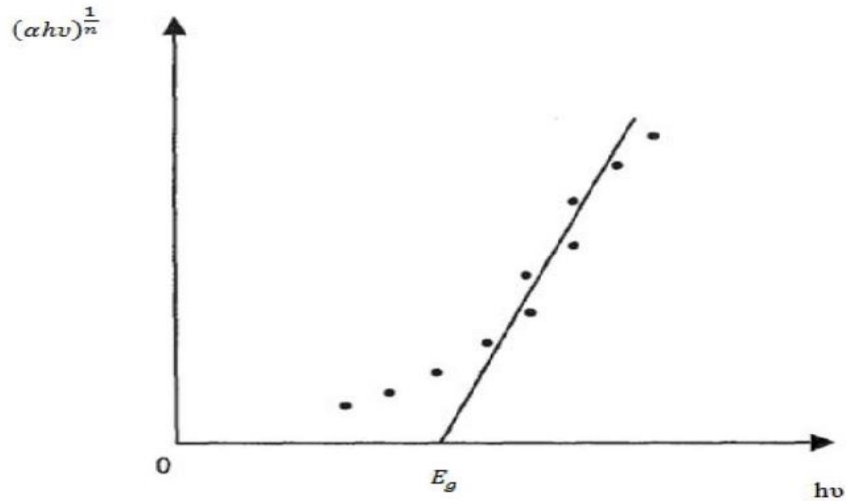
$\alpha(h\nu) \approx (h\nu - E_g)^n$ denkleminde;

$n=1/2$ değerinde malzeme izinli doğrudan band aralığına,

$n=3/2$ değerinde malzeme izinsiz doğrudan band aralığına,

$n=2$ değerinde malzeme izinli dolaylı band aralığına,

$n=3$ değerinde malzeme izinsiz dolaylı band aralığına sahiptir [12].



Şekil 2. 6: Yasak enerji aralığının soğurma yöntemi ile belirlenmesi [17].

2.1.6 Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri

2.1.6.1 Asal yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu

Elektronlar ve boşluklar yarıiletkenlerde serbest yükler olarak tanımlanır ve elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Asal yarıiletkenlerde elektronların ve boşlukların sayısı birbirine eşittir. Çünkü valans bandındaki bir boşluk ancak bir elektronun uyarılması ile

meydana gelir. İletkenlik bandındaki elektronların ve valans bandındaki boşlukların durum yoğunlukları;

$$N_e(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_i)^{1/2} \quad (2.18)$$

$$N_b(E) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{2m_b^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_d - E)^{1/2} \quad (2.19)$$

eşitlikleri ile verilir.

İletkenlik bandındaki elektronların konsantrasyonu;

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^*}{h^2} kT \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{(E_i - E_f)}{kT} \right] \quad (2.20)$$

Valans bandındaki boşlukların konsantrasyonu;

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_b^*}{h^2} kT \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{(E_f - E_d)}{kT} \right] \quad (2.21)$$

eşitlikleri ile verilir. Burada E_f ; Fermi seviyesi, E_i ; iletkenlik bandının alt sınırı, E_d ; değerlik bandının üst sınırı, m_e^* ; elektronun etkin kütlesi ve m_b^* ; boşluğun etkin kütlesidir. Asıl bir yarıiletken $n = p$ olduğundan fermi enerjisi;

$$E_f = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_b^*}{m_e^*} \right) \quad (2.22)$$

ile verilir. Görüldüğü gibi fermi enerjisi m_e^* , m_b^* ve T değerlerine bağlıdır. $m_e^* = m_b^*$ olduğunda $E_f = E_g/2$ olur yani asıl bir yarıiletken fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasında bulunur [25].

2.1.6.2 Katkılı yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu

N-tipi yarıiletkenlerde elektronlar sayıca boşluklardan daha fazladır dolayısıyla elektronlar çoğunluk taşıyıcıları ve boşluklar azınlık taşıyıcılarıdır. Verici atomların iyonlaşma enerjisi düşüktür ve tüm verici atomları iyonlaştığında elektronlar iletkenlik bandına geçer ve $n = N_d$ olur. Taşıyıcı konsantrasyonu;

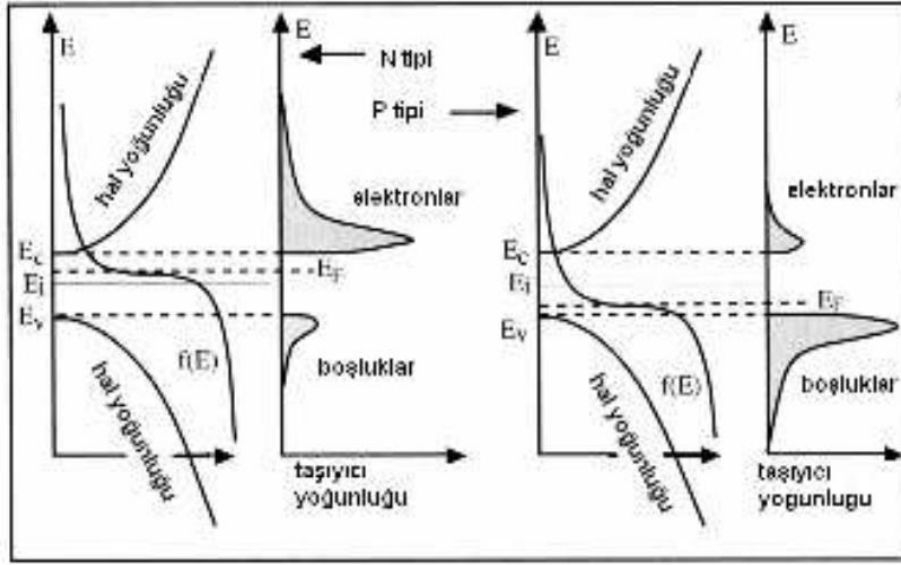
$$n = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^*)^{3/2} \exp (E_f - E_g/kT) \quad (2.23)$$

eşitliği ile verilir.

p-tipi yarıiletkenlerde boşluklar çoğunluk taşıyıcıları ve elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır. Taşıyıcı konsantrasyonu;

$$p = 2\left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}(m_b^*)^{3/2}\exp(-E_f/kT) \quad (2.24)$$

eşitliği ile verilir. Şekil 2.7’de n ve p-tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesi ve taşıyıcı konsantrasyonu verilmiştir.



Şekil 2. 7: n ve p-tipi yarıiletkenlerde fermi seviyesi ve taşıyıcı konsantrasyonu [12].

2.1.6.3 Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik

Elektronların ve boşlukların iletkenliğe katkıda bulunmasından dolayı yarıiletkenlerin önemli özelliklerinden birisi de elektriksel özellikleridir [13].

Kesit alanı A, uzunluğu l olan bir katı cismin uçları arasında V büyüklüğünde bir potansiyel fark uygulandığında iletkenin I akımı geçecektir ve cismin herhangi bir kesit alanında, genişliği w olan bir parçanın içerisinde yük taşınımı meydana gelecektir. V potansiyel farkı iletken içerisinde bir E elektrik alanı meydana getirecek ve bu alanın etkisiyle elektronlar ortalama bir hıza sahip olacaklardır. İletkenin w kadar uzunluğundaki kısmının hacmi wA’dır ve n elektron yoğunluğu olmak üzere n wA kadar elektron içerir. Her bir elektronun Coulomb yükünü taşıdığını ve

$$w=vt \quad (2,25)$$

olduğunu göz önüne alırsak birim zaman da geçen parçacık sayısı $en\mu EA$ olacaktır μ ; mobilitedir ve iletkenlik için;

$$I = en\mu EA \quad (2.26)$$

$$I = en\mu V \frac{A}{l} \quad (2.27)$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{en\mu} \frac{l}{A} \quad (2.28)$$

$$\rho = \frac{1}{en\mu} = \frac{1}{\sigma} \quad (2.29)$$

$$\sigma = en\mu \quad (2.30)$$

olarak elde edilir. Akım yoğunluğu (J) bir iletkenin birim yüzeyinden geçen akım olarak tanımlanır ve

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.31)$$

ile ifade edilir. Denklem $I = en\mu EA$ ve $\sigma = en\mu$ kullanılarak

$$J = \sigma E \quad (2.32)$$

$$J = en\mu E \quad (2.33)$$

olarak bulunur.

Eğer bir cisimde iletkenlik sadece elektronlar ile değil de hem elektronlar hem de boşluklar ile sağlanıyorsa iletkenliğe her iki taşıyıcının da katkısı vardır.

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_b) \quad (2.34)$$

Burada e ve b indisleri sırasıyla elektronları ve boşlukları temsil eder. Burada iletkenlik bipolardır. Denklem $J = en\mu E$ ve $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_b)$ kullanılarak;

$$J = e(n\mu_e + p\mu_b)E \quad (2.35)$$

olarak verilir.

Metallerde iletkenlik tek kutupludur ve sadece elektronlar yük taşıyıcılarıdır[20]. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik; tünelleme, termoiyonik emisyon, en yakın komşular arası sıçrama ve değişken mesafeli sıçrama ile gerçekleşir [22]. Tünelleme kuantum mekaniksel bir süreçtir ve ilk defa Eley tarafından ortaya atılmıştır [28]. Tünelleme sırasında elektronun enerjisi korunduğu varsayılır ve elektron oluşan engellerin içinden geçip diğer moleküle ulaşır. Bu ilerleyiş birkaç molekül boyunca devam edebilir [28]. Termoiyonik emisyon ile iletim de yeteri kadar uyarılmış elektron engellerin üzerinden sıçrayarak geçer

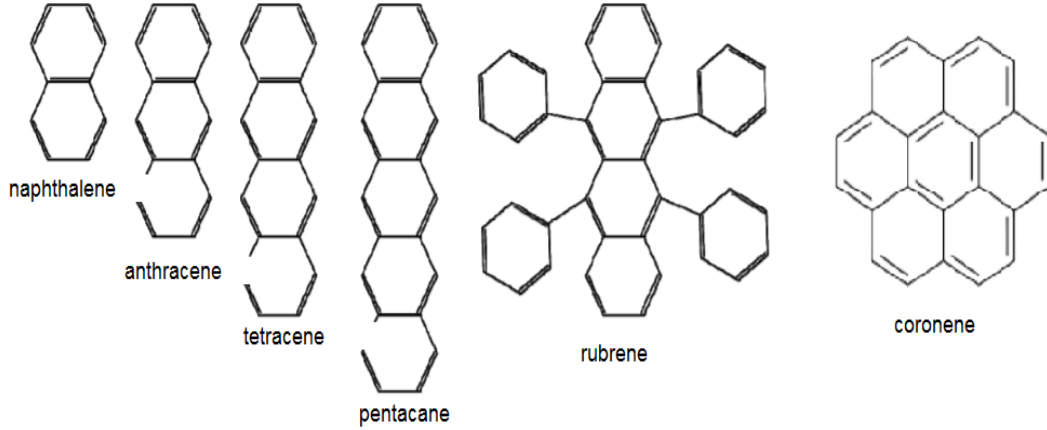
[29]. Eğer bir yarıiletken düşük katkılama bölgesi ya da yüksek sıcaklıkta ise elektronlar grain sınırındaki engellerin üzerinden termoiyonik emisyonla iletilir. Bunun tam tersi durumda da iletim ısısal alan emisyonu ile gerçekleşir. Yarıiletken polikristal filmlerde grain sınırları elektriksel iletkenlikte önemli rol oynar. Film kalınlığı arttığında kristalin boyutu da artar. Bu da grain sınırındaki tuzaklamaların azalmasına sebep olur ve iletkenlik artar. Tam tersi durumda kalınlık azaldıkça kristal boyutu azalır ve tuzaklamalar artar bu da iletkenliğin azalmasına sebep olur. Tuzak durumu artarsa taşıyıcılar da durma noktasına gelir. Yani bir kristalde parçacık boyutu artar ise grain sınırlarında saçılmaların azalmasına yol açar bu da iletkenliği artırır. En yakın komşular arası sıçrama aktivasyon enerjisinin düşük olduğu durumlarda bazı sıcaklık bölgelerinde gerçekleşir. Düşük sıcaklıklarda n-tipi yarıiletkenlerde verici atomları serbest elektronların birçoğunu yakalar. Bu durumda elektronlar donör seviyesinden iletim bandına sıçramak için yeterli enerjiye sahip olamazlar. O zaman iletim bandı daha az önemli duruma gelir ve safsızlık bandındaki verici durumları arasındaki direkt elektron sıçraması iletim mekanizması ana katkıyı sağlar. Enerji seviyelerindeki farklılıklardan dolayı bazen en yakın iki komşu arasında elektron sıçraması meydana gelmeyebilir. Elektronlar daha yüksek enerjiye sahip olmak için benzer uzaklıktaki bölgeye hareket etmeyi seçerler. Bu durumda değişken mesafeli sıçrama ile iletim meydana gelir [30].

2.1.7 Organik yarıiletkenler

Yarıiletken özellik gösteren organik malzemelere organik yarıiletken denir. Düşük maliyetli, hızlı, pratik ve kolay üretim yöntemlerine sahip olmaları, esnek ve geniş yüzeyler üzerine uygulanabilme özelliklerinden dolayı organik yarıiletkenler son zamanlarda dikkat çekici malzemeler haline gelmiştir. Organik yarıiletkenler organik ışık yayan diyot (OLED), fotodiyot, organik ince film transistörler (OTFT), organik güneş pilleri gibi cihazların temelini oluşturmaktadır [23].

Organik yarıiletkenler iki gruba ayrılmaktadırlar. İlki tekrarlanamayan bir yapıya sahip olan yani monomerlerin oluşturduğu küçük moleküllü organik yarıiletkenlerdir. Molekül ağırlıkları düşüktür. Benzen halkaları bir araya gelerek lineer acene molekülleri oluştururlar. Bu moleküller iyi derecede yarıiletken kristallerdir. Acene yapısında karbonlar sp^2 hibritleşmesine sahiptirler ve karbonlar σ bağları ile komşu atomlara bağlanmaktadır. Acene molekülündeki $2s$, $2p_x$ ve $2p_y$ orbitalleri hibritleşebilmektedir ve üç σ bağından oluşmaktadır. Kalan $2p_z$ orbitali bir π bağ oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Elektronların kendini sağa sola dağıtıp, tek bir atomla yetinmeyip birçok atom tarafından paylaşılması

(delokalizasyon) molekül zinciri boyunca π orbitalleri arasındaki örtüşme yoluyla gerçekleşmektedir. Şekil 2.8’de gösterilen organik yarıiletkenlerin karbon atomlarının π orbitalleri ve π bağı ile birbirine tutulan bir konjuge π -elektron sistemine sahiptirler.



Şekil 2. 8: Organik yarıiletkenlerin karbon atomlarının π orbitalleri ve π bağı ile birbirine tutulan bir konjuge π -elektron sistemi [21, 22].

İkinci grup büyük molekül ağırlığına sahip, aynı yapıdaki monomerlerin zincirleme şeklinde bir araya gelmesiyle ya da farklı monomerlerin bir araya gelmesiyle oluşturdukları polimerlerdir. Bu yapı çözelti içerisinde kolaylıkla çözünmektedir. Düşük molekül yapıları organik yarıiletkenlere göre daha az kristalleşebilme özelliğine sahiptirler. Monomerler ve polimerler konjuge bağlardan ana zincir içermektedir. Bu yapı iletkenliğin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Elektronik sistemdeki bağlardan π bağları σ bağlarına nazaran daha zayıftır.

Organik yarıiletkenlerin ilk bulunuşu 1900 lü yılların başında antresen bileşiğinin fotoiletkenliği üzerine çalışmalarla ortaya çıkmıştır [31]. Organik yarıiletkenlerin inorganik yarıiletkenlerden farklı iletim mekanizmasına sahiptirler. Yük taşıyıcıları kristal içerisindeki bandlar aracılığı ile iletimden ziyade enerji seviyelerinde atlama mekanizması ile hareket ederler. Molekülleri oluşturan atomlar zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağ oluştururlar [32]. 1950’li yılların başında Bernanose ve diğ. organik bir malzemeye alternatif akım (AC) uygulayarak bu malzemenin elektrolüminans özelliği sergilediğini gözlemlemişlerdir ve tarihe organik maddelerin elektrolüminansa ilişkin keşfi olarak geçmiştir [33]. Pope M. ve diğ. 1960’lı yılların başında organik bir malzeme üzerinden kontak alarak elektron ve boşluk akımlarının elde edilebilmesi için gerekli şartları sağlamışlardır [34]. Bu durum OLED’lerin sentezlenebilmesinde öncü çalışma olarak yer almaktadır. 1977 yılında konjuge polimerler olarak bilinen organik yarıiletkenin keşfi Hideki Shirakawa, Alan J. Heeger ve Alan G.

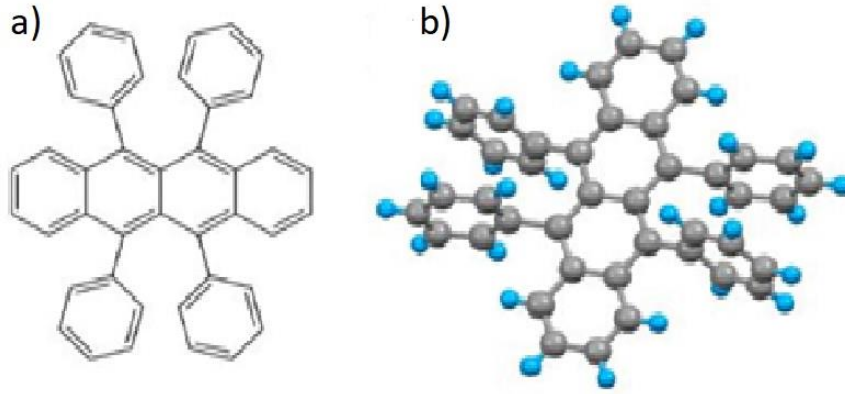
MacDiarmid'e 2000 yılında Nobel kimya ödülünü kazandırmıştır [35]. 1984 yılında Harima ve diğ. iki organik yarıiletkeni bir araya getirip heteroeklem oluşturmalarıyla tabakalar arasında fotonlar sayesinde etkin bir yük üretimi olduğunu gözlemlemişlerdir [36]. 1987 yılında mikro elektronik sensörlerin en önemli bölümlerinden olan organik alan etkili transistör (OFET) tanımlanmıştır [37]. Organik alan etkili transistörler silisyum bazlı transistörlere göre birçok avantaja sahiptirler. Keşfedildikleri yıllarda inorganik malzemelerle üretilen transistörlere göre düşük mobiliteye sahiptirler fakat son yıllardaki çalışmalarda bu eksiklikler giderilmiş ve inorganik tabanlı transistörlerin mobiliteler değeri yakalanmıştır [38].

2.1.7.1 Rubrene organik yarıiletken

Rubrene (5, 6, 11, 12 tetraphenylanthracene, $C_{42}H_{28}$) yük taşıyıcı mobilitesi, eksiton yayılım uzunluğu, fotoakım üretme verimliği gibi özelliklere sahip olmasından dolayı gelecek vadede küçük yapıları organik bir yarıiletken [39]. Rubrene 1960'dan beri elektrolüminesans ve kemilüminesans özellikleri ile göz önünde olan fakat keşfi 1900'lü yılların başlarına dayanan çok halkalı aromatik hidrokarbondur [40]. Rubrene iki merkezi benzen (C_6H_6) halkasının her iki tarafına bağlı fenil (C_6H_5) tetracen (dört yapışık benzen halkası) temellinden oluşur ve p-tipi yarıiletken özelliği sergiler [12]. Erime noktası $315^{\circ}C$, molar ağırlığı 532,7 gr/mol olan kırmızı renkli bir bileşiktir [39]. Rubrenin en önemli uygulamaları fotovoltaik (PV) hücreler [41], ışık yayan diyotlar (OLED) [42], organik alan etkili transistörler (OFET) [43], organik-inorganik heteroeklemlerdir [44]. Şekil 2.9-10'da rubrene'nin toz hali ve moleküler yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. 9: Toz haldeki rubrene [45].



Şekil 2. 10: a) Yapısal formül, b) Üç boyutlu resim (H atomları gösterilmemiştir) [39].

Rubrene molekülü üç farklı fazda (monoklinik, ortorombik ve triklinik) kristalleşebilmektedir fakat ortorombik fazda kristalleşmesi diğerlerine göre daha kolaydır [46]. Son zamanlarda organik yarıiletkenlerin yük taşıyıcı mobilitesi; ince film kristal kalitesinin artırılması, yeni materyallerin sentezlenmesi, malzeme mühendisliğinin gelişmesiyle artırılmıştır. Polikristal filmlerde taşıyıcı mobilitesinin azalmasının sebebi grain sınırları, enerji bariyerleri ya da tuzak yerleşimler olarak bilinirdi fakat Vladimirov I. ve diğ. mobilitenin azalmasının bir diğer sebebinin grain sınırlarındaki düzensiz bir şekilde yerleşen moleküllerin sebep olduğunu yayınladılar [47]. Ayrıca Wong C.Y. ve diğ. TIPS-pentacene grain sınır bölgesini yük taşıyıcı mobilitesini azaltan rastgele dağılmış nanokristallerinden oluştuğunu gözlemlemişlerdir [48]. Bu yüzden organik yarıiletkenlerde grain sınırlarının rolünü ve yapısını anlamak, lokal yapıları analiz etmek organik elektronik devrelerin gelişmesinde hayati önem taşımaktadır. Foggiatto A.L. ve diğ. rubrene polikristal ince filmlerinin grain sınırlarında düzensiz bölgelerin oluşumunu ve bu oluşumların anlaşılması için bir çalışma yürütmüşlerdir [49]. Burada hem pelet halde hem de toprak halinde rubrene kristali STXM (taramalı iletim x-ray mikroskobu) ile analiz edilmiştir. STXM analizinde kristaldeki lokal yapıların diziliminin niceliği ve yapılar arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Pelet halindeki rubrene polikristal filminin molekülleri homojen bir şekilde yönlendiği, grain sınırlarının gayet düzenli olduğu görülürken toprak haldeki filmlerin grain sınırlarında pürüzlülüklerin var olduğu, moleküllerin gelişi güzel yönlendiği görülmüştür. Bölge sınırlarındaki rubrene moleküllerinin rastgele dağılımı tampon ve saçılma merkezlerini oluşturmuş bu da yük taşıyıcı mobilitesinin azalmasına sebep olmuştur [49].

Barış B. Al/rubrene/p-Si Shottky diyotunu spin coating (döndürerek kaplama) metodunu kullanarak p-tipi Si üzerine rubrene kaplayarak elde etmiştir [50]. Elde edilen heteroeklemin 5 kHz-500 kHz frekans aralığında frekansa bağlı olarak kapasitans-voltaj (C-V-f) ve

iletkenlik-voltaj (G-V-f) özellikleri incelenmiştir. Bu incelemeler neticesinde frekansın artmasıyla kapasitans değerinin azaldığını gözlemlemiş ve sebebin arayüz durumlarının varlığı olduğunu belirtmiştir. Tüm frekans değerlerinde seri direnç-voltaj (R_s -V) grafiklerinde fakirleşmiş bölge piklerinin var olduğunu gözlemlemiş ve C-V ve G-V ölçümlerinden arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve gevşeme sürelerini (τ) hesaplamıştır [50].

Son zamanlarda katkılama işlemleri üzerine çalışmalar organik fotovoltaiik hücrelerin elde edilmesinde gelişen teknolojiye ayak uydurmaktadır. Rudiono ve diğ. ITO/CuPc+perylene/Al Shottky tipi güneş hücresinin performansını artırmak için CuPc ye perylene katkılanmışlardır [51]. Chan M.Y. ve diğ. CuPc/C₆₀ heteroekleminin hem donör hemde akseptör tabakalarına rubrene katkılıyıp Voc (açık devre voltajı) ve Jsc (kısa devre akım yoğunluğu) değerlerini iyileştirmeye çalışmışlardır [52]. Bu katkılama ile Jsc değerini, foton soğrulmasını, iletkenliği artırmışlardır fakat Voc değerinin artmasını açıklayamamışlardır. Liu Z. ve diğ. CuPc/C₆₀ heteroeklemine rubrene katkılanmış, ultraviyole foto emisyon spektrometre (UPS) ve X-ray foto emisyon spektrometresiyle (XPS) Voc başta olmak üzere devre performansını artırmak için fiziksel değerlerin incelenmesini amaç edinmişlerdir. Yapılan ölçümlerde rubrene katkılanmış CuPc ve C₆₀ tabakalarının HOMO_D-LUMO_A değerlerinin önemli bir derece artış gösterdiği ve bu artışın Voc değerinde artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca elektrik alan altında rubrene katkılı CuPc/C₆₀ heteroeklemi incelenmiş karanlık akım kaçığının azaldığı, yüksek voltaj çıkışının arttığı ayrıca akım çıkışına fayda sağlayan eksiton ayrışmasının arttığı görülmüştür [53].

Sinha S. ve diğ. rubrene ince filmlerini Au, Ag, SiO₂ kaplı Si ve hidrojenle arındırılmış Si yüzeyleri üzerine termal kaplama yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütmüşler ve kalınlığa bağlı elektronik ve yüzey morfoloji özelliklerini incelemişlerdir [54]. Burada Au ve Ag metal, SiO₂ kaplı Si yarıiletken ve hidrojenle arındırılmış Si dielektrik yüzey olarak kullanılmıştır. Elektronik özelliklerin incelenmesinde ultraviyole foto emisyon spektrometre (UPS) ve X-ray foto emisyon spektrometresi (XPS) analiz yöntemlerini kullanırken yüzeysel özelliklerin incelenmesinde atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanmışlardır. Yapılan ölçümlerde rubrene/Au ve rubrene/Ag arayüzey dipol değerleri sırasıyla 1,13-0,62 eV olarak bulunmuştur. Kalınlığa bağlı olarak tüm yüzeyler üzerindeki rubrene ince filmlerinin arayüzey elektronik enerji seviye dizilimleri son durumda açığa çıkan foto emisyon enerjisi ya da foto-boşluğun elektrostatik taranmasının dielektrik model ile açıklanmıştır. Metallerin dielektrik sabiti sonsuz olduğu için metalik yüzeylerdeki enerji dizilim seviyeleri kalınlığa

bağlı olarak ölçülebilir. Au/rubrene heteroekleminde rubrene için boşluk enjeksiyon bariyer yüksekliği 5 Å-200 Å kalınlıklarında oluşan HOMO seviyeleri 0,5 eV-1,10 eV değerlerine sahiptir. Bu değerler Ag/rubrene için 1,28 eV-1,81 eV olarak hesaplanmıştır. Dielektik modele göre Si-O, Si-H ve rubrene'in dielektik sabitleri birbirine çok yakın olduğundan dolayı kalınlığa bağlı enerji seviye dizilimleri rubrene/dielektik ve rubrene/yarıiletken arayüzeyleri için ihmal edilebilir. Yani boşluk enjeksiyon bariyer yüksekliği Si-O ve Si-H üzerindeki rubrene için kalınlıkla değişmemektedir. AFM yüzey analizi sonuçlarına göre farklı yüzeyler üzerine büyütülen rubrene filmlerinin farklı formlara sahip olduklarını gözlemlemişlerdir [54].

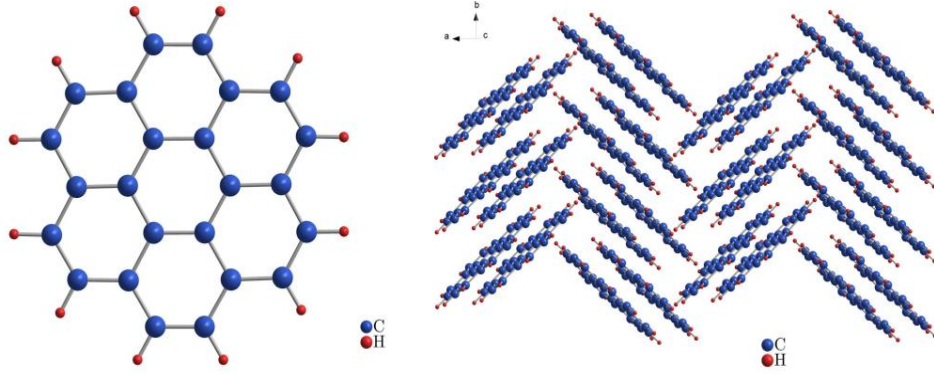
2.1.7.2 Coronene organik yarıiletken

Coronene bir döngüde dizilmiş 6 benzen halkasının bir araya gelmesiyle oluşan bir moleküldür. Coronene örgü parametreleri $a=13,094$ Å, $b=4,690$ Å, $c=10,049$ Å ve $\beta=110,79^\circ$, uzay grubu $P2_1/a$, farklı iki birim hücreye sahip ve monoklinik kristal yapısına sahiptir. 140-18 °K ve 5 °K sıcaklık değerleri ve basınca bağlı olarak iki farklı kristal yapısı gösterir [55]. Coronene şekil 2.11'de görüldüğü gibi sarı renkli $C_{24}H_{12}$ formülüne sahip bir moleküldür. Coronene'in mol kütlesi 300,36 gr/mol [56], yoğunluğu $1,371$ gr/cm³, erime noktası 437,3 °C dir. Çözelti halindeyken UV ışık altında mavi ışık yayar [57]. Şekil 2.12'de coronene'nin moleküler ve kristal yapısı verilmiştir.



Şekil 2. 11: Coronene toz hali [58].

Coronene yüksek derecede D_{6h} simetrisine sahip π - bağlı yarı yoğunluk çok halkalı aromatik hidrokarbondur (PAH).



Şekil 2. 12: Sol şekil coronene'in moleküler yapısının şematik gösterimi, sağ şekil coronene'in kristal yapısı [55].

Perilen [59], rubrene [60] ve DTVBi [61] gibi çok halkalı hidrokarbonlar çoğu zaman ışık yayıcı materyaller olarak kullanılır. Bu aileden olan coronene de iyi derecede yük taşıyıcılarına ve yüksek termostabilliğe sahip olması, güçlü fotolüminesans özelliği göstermesi gibi özelliklerinden dolayı dikkat çekici bir materyal olmuştur. Coronene'nin yüksek derecede kristal simetrisi katı halde kristalleşmeye güçlü bir eğilim gösterir.

Fiziksel buhar depolama yöntemi ile coronene ince filmlerini elde etmek zordur. Bu yüzden Zang R. ve diğ. LED üretmek için ışık yayıcı materyal olan coronene'ni farklı oranlarda poly (9-vinilkarbazol) (PVK)'ye katkılایarak bu karışım filmlerini ITO yüzeye spin coating (dödürerek kaplama) yöntemiyle kaplamış, elektrolüminesans, fotolüminesans ve multieklemlerin I-V karakterizasyon özelliklerini araştırmışlardır [62]. Analizler neticesinde coronenin hem kristal hali hem de karışım halinde iyi bir boşluk taşıyıcısı olduğu, coronene/PVK karışımı dikkate değer bir biçimde uyumlu olduğu ve LED üretiminde yayıcı bir tabaka olarak kullanılabilirliğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca ITO/(coronene/PVK)/BBOT/Al heteroekleminde elektron taşıyıcı materyal olarak BBOT'un eklem performansını ciddi derecede artırdığı ve elektrolüminesans verimliliğinde yük dengeleyicisi olarak verimi artırdığını tespit etmişlerdir [62].

Organik bir malzemeye dış elektrik alan (E_{ext}) uygulanması carbon nanotüpler, organik iletkenlik, hidrojen bağ kompleksleri gibi özelliklerin kontrol edilmesi ile yeni tip materyaller elde etmek için kullanılabilir. Fakat bunun ötesinde E_{ext} uyumsal denge, optik özellikler, moleküler dinamik, moleküler yapı hakkında önemli bilgiler sağlamak ve maddenin önemli özelliklerini irdelemek için de yaygın bir şekilde kullanılabilir. Qing L. ve diğ. büyük π -bağlı merkezi simetrik sistemler için yüksek performansta elektro-optiksel materyallerin tasarlanmasını geliştirmeyi hedeflemişlerdir [63]. Bu çalışmalarında z-ekseni

doğrultusunda farklı büyüklükte E_{ext} altında coronene'nin elektronik özelliklerini araştırmışlardır ve aynı zamanda orbital analizi yapmışlardır. Coronene'nin E_{ext} altında geometrik yapısının değiştiğini öyle ki alan kuvveti artırıldığında oyuk yapıların kıvrımlı yapılara dönüştüğünü gözlemlemişlerdir. E_{ext} nin artırılmasıyla ayrılmış molekül orbital enerjileri, kıvrımlı yapılarda meydana gelen orbitallerin yeniden dağılımları ve temel negatif yük merkezi altılı halkada dereceli bir şekilde yoğunlaşmıştır. Yük taşıyıcılarındaki değişiklik lineer olmayan optiksel (NLO) özelliklerin ve coronene'nin aromatikliğinin önemli derecede değişmesine sebep olmuştur. Dış elektrik alanının artması kıvrımlı yapıdaki coronene'ni düzensiz bir şekilde oluşturuyorken NLO özelliklerini, aromatikliği ve coronenedeki oyuklu yapıları düzenli bir şekilde değiştirdiğini gözlemlemişlerdir [63].

Bir başka çalışmada Barış B. ve diğ. fiziksel buhar depolama yöntemi ile coronene'ni cam alt taban üzerine büyütmüş ve elde edilen filmlerin optiksel ve yapısal özellikleri incelemişlerdir [64]. 80 nm kalınlığındaki filmin optik ve geçirgenlik yasak enerji bandlarını 3,2 ve 3,5 eV olarak hesaplamışlardır. Ayrıca filmin görünür bölgedeki geçirgenliğini yüzde 70-90 olarak gözlemlemişlerdir. Uzay grubu P21/c (14), monoclinic örgü tipi ve $a=10.035000 \text{ Å}$, $b=4.695000 \text{ Å}$, $c=16.014000 \text{ Å}$, $\beta=111.000000^\circ$ örgü parametrelerine sahip coronene'nin kristal yapısını XRD analizi ile doğrulamışlardır. SEM analizinde 50-140 nm çapında nano tellerin varlığı ve bu tellerin gelişigüzel bir şekilde yüzeyi kapladığını görmüşlerdir [64].

2.1.8 İnorganik yarıiletkenler

Bakır kimyasal formülü Cu olan B grubu metalidir. Atom numarası 29 [65], atom ağırlığı 63,546 gr/mol [66], erime noktası 1083 °C ve kaynama noktası 2300 °C olan ve gümüşten sonra doğada en iyi iletken olan elementtir [65]. İndiyum III-A grubunda olan atom numarası 49, atom ağırlığı 114,818 gr/mol [1], yoğunluğu $7,31 \text{ gr/cm}^3$, erime noktası 156 °C, kaynama noktası 2027 °C, gümüş beyaz renginde, yumuşak, kolayca şekil alabilen geçiş metalidir [67]. Galyum kimyasal simgesi Ga, atom numarası 31, atom ağırlığı 69,723gr/mol olan elementtir. Erime noktası 29,8 °C, kaynama noktası 2204 °C [68] dir. Selenyum ise periyodik tablonun VI-A grubundadır. Atom numarası 34, atom ağırlığı 78,6gr/mol [1] erime noktası 221 °C, kaynama noktası 685 °C metalik veya kırmızı toz rengindeki yarı metaldir [69].

2.1.8.1 InSe inorganik yarıiletken

İndiyum monoselenid $A^{III}-B^{VI}$ grubu GaS ve GaSe bileşiklerine benzer olarak tabakalı bir yapı içerir. Bu yapı iki boyutta kovalent bağlar ile üç boyutta Van der Waals kuvvetleri ile sınırlandırılır.

III-VI ikili tabakaları yapısal olarak tabakaların sıralanışı bakımından farklı politiplerde bulunabilirler. Bu ikili tabakalar yapısal olarak aynıdır ve VI. grup atomları ve bu atomlar arasında kalan iki düzlem arasında kalan iki III. grup atom tabakasının D_{3H} simetrisinde prizma yapısından oluşur. Sonuç olarak her bir ikili tabaka, dört atomik düzlem içerir. Bu düzlemlerden ikisi III. grup, ikisi VI. grup atomlarından oluşur. InSe bileşiğinde indiyum düzlemindeki atomlardan her biri, hemen yanındaki selenyum atomik düzleminde yer alan üç selenyum atomuna ve diğer tarafta ise bir indiyum atomuna komşudur. Selenyum atomları arasındaki uzaklık indiyum atomları arasındaki uzaklıktan daha fazladır ve indiyum ve selenyum atomları arasındaki bölgede bir asimetri söz konusudur. Birbiri üzerine gelen iki boyutlu atomik düzlemler arası mesafe, oluşan politipin örgüsünü belirler. GaS ve GaSe β - ve ϵ - politiplerinde kristalleştiği görülürken Bridgeman yöntemiyle elde edilen InSe nin γ -politipinde rombohedral yapıda kristalleşmesi beklenir [70].

InSe kompleks tabakalı yarıiletkenin doğrudan bant aralığı 1,42 eV ve dolaylı bant aralığı 1,29 eV dur. Katkılamaya ve reaksiyon şartlarına göre p-tipi ya da n-tipi davranış sergileyebilir. In_2Se_3 , sahip olduğu polimorfizmden ve metal iyon kusurlu yapısından dolayı dikkat çekmektedir. In_2Se_3 α , β ve γ ile gösterilen ve α - β ve β - γ geçiş sıcaklıkları sırasıyla 200 °C ve 650 °C olan en az 3 farklı kristal modifikasyonu gösterir. n-tipi In_2Se_3 hegzagonal yapıda ve doğrudan bant aralığı 1,7 eV olan bir yarıiletkenidir. Oda sıcaklığında In-Se faz diyagramı In_2Se , InSe, α - In_2Se_8 , α - In_2Se_3 şeklinde dört tanımlı bileşik gösterir. Bunlar bataryalar ve foto-elektrokimyasal hücrelerin potansiyel uygulamaları için dikkat çekici malzemelerdir [71].

Gopal S. ve diğ. elektrokimyasal depolama yöntemini kullanarak InSe ince filmlerini elde etmişlerdir [72]. Deneysel parametrelerden öncü çözeltilerin derişiminin değiştirilmesiyle bileşikteki elementel dağılımı, yüzeysel, yapısal ve optiksel özellikleri incelemişlerdir. [72].

Güneş hücreleri için iletken bir alt taban üzerine biriktirilen yarıiletken ince filmler son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. III-VI grubu yarıiletken bir bileşik olan InSe umut vadeden yapılar arasındadır [73]. Yine bir başka çalışmalarında Gopal S. ve diğ. cam/ITO alt tabanı üzerine InSe bileşiğini kaplamışlar ve Ag kontaklar alarak sıcaklık değişimine

karşı cam/ITO/InSe/Ag kontağının iletkenlik karakterizasyonunu incelemişlerdir [73]. 300-380 °K sıcaklıkları arasında ölçülen akım-gerilim karakteristiğinde düşük alan iletkenliğinin Mott değişken sıçrama aralığı tipine (Mott's variable range hopping) yüksek sıcaklık akım-gerilim çalışmasında iletkenliğinin ise Poole-Frenkel tipinde olduğu görmüşlerdir [73].

Pahtan H.M. ve diğ. M-CBD metodunu kullanarak indiyum selen ince filmi üzerine çalışmışlardır [71]. Filmin yüzey morfolojisel, düzensel, yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri çeşitli yöntemlerle karakterize etmişlerdir. Filmlerin nanokristal ve In₆Se₇, InSe, In₂Se₃ fazlarını içerdiğini belirlemişlerdir. Filmin yüzeyinin pürüzlü olduğu ve filmin soğurmasından yasak enerji aralığının 2,5 eV olduğu tespit etmişlerdir. Filmin iletkenlik tipinin n-tipi, elektriksel direncinin 10⁶ ohm-cm olduğu belirlemişlerdir [71].

Kobbi B. ve diğ. InSe ince filmlerini alt taban sıcaklıkları (T_s=30, 100, 160, 200 °C) farklı olan cam üzerine flaş ve termal buharlaştırma yöntemi ile büyütmüşlerdir [74]. En iyi filmleri 160 °C alt taban sıcaklığı ve 200 °C'de 6 saat tavlama ile elde etmişlerdir. Termal buharlaştırmayla elde edilen filmlerin analizinde güçlü yapı bozukluklarının olduğu görmüşlerdir. XRD analizinde oluşan fazların In₄Se₃ ile InSe şeklinde olduğu tespit etmişlerdir. Üretikleri ince filmlerin kalınlıkları 1µm ile 1,5µm arasında değişim göstermiştir. Fakat kalınlığın optiksel ölçümler hariç diğer deneysel sonuçları önemli bir derecede etkilemediğini görmüşlerdir. Farklı kalınlıklarda oluşturulan ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları 1,28 eV ile 1,38 eV arasında değiştiği gözlemlenmiştir [74].

Yüksek lisans çalışmamda InSe ince filmi cam, InSe_{tek} kristal, GaSe_{tek} kristal, cam/GaSe_{incefilm} ve Cam/CdS_{incefilm} alt tabanları üzerine M-CBD yöntemi kullanarak büyütüp ve elde edilen heteroeklemlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerini inceledim [1]. Elde edilen filmlerin kalınlığı 112 nm olarak hesaplandı. Cam alt taban üzerine büyütülen filmin γ-In₂Se₃ hegzagonal yapısında olduğu, 100-150°C'de tavlama ile yasak enerji band aralıklarının 2,03 eV ile 1,21 eV arasında değiştiği tavlama ile yasak enerji band aralığının 1,05 eV'a kadar düştüğü görüldü. Yapılan elektriksel ölçümlerde tüm heteroeklemlerin ışığa duyarlı olduğu tespit edildi. Filmlerin parçacık boyutları AFM ile ölçüldü ve tavlama ile parçacık boyutlarının arttığı görüldü. Parçacık boyutundaki artış yasak enerji band aralığının düşmesine ve aynı zaman da elektriksel iletkenliğin artmasına sebep olduğu rapor edildi [1].

2.1.8.2 CIS inorganik yarıiletken

Yenilemeyen enerji kaynaklarının maliyeti gün geçtikçe yükselmekte ve bu yüzden alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş enerjisi, rüzgar enerjisi vb.) çevreye zarar vermemesi, atık bırakmaması ve kaynak olarak sonsuz olması bu enerji kaynaklarına talebi artırmaktadır. Bakır (Cu), indiyum (In) ve selenyum (Se) atomlarından meydana gelen, üçlü yarıiletken bileşik olan CuInSe (CIS) direk band aralığına, yüksek soğurma verimliliğine, foto-dejenerasyonuna karşı dirençli ve iyi termal stabilliğine sahip olmasından dolayı öncü yarıiletken bileşikler içerisinde yer almaktadır [75-77]. CIS düşük maliyeti ile ince film güneş hücreleri arasında gelecek vadeden soğurucu materyaller arasında öncü bileşiklerden biridir. Üretimi kolay, maliyeti az, üzerine gelen güneş ışınlarını soğurabilme kapasitesi yüksek olan CIS güneş hücreleri arasında en iyi bileşikler arasındadır [78].

CIS ince filmlerinin hazırlanmasında buharla depolama, sıçratma(sputtering), selenizasyon ve ek olarak elektrokimyasal depolama gibi birkaç yöntem vardır. Bu yöntemler arasında elektrokimyasal depolama yönteminin iki çeşidi vardır, bunlar tek adımlı ve iki adımlı elektrokimyasal depolamadır. Şimdiye kadar tek adımlı elektrokimyasal depolama ile yüksek sıcaklık, vakum kazanı vb. yüksek maliyetli, zor parametreler kullanılmadan yüksek kalitede, geniş alanlı CIS ince filmleri üretilmiştir [75, 79, 80].

Kashyout A. E. ve diğ. CIS ince filmini elektrokimyasal depolama yöntemi kullanarak tek bir sulu çözelti içerisinde gerçekleştirmişlerdir [75]. CIS ince filmini hazırlamak için en iyi şartların; 40 °C’de -0,6 V potansiyel altında elde edilen filmlerin 450 °C’de sistemden azot geçirilerek 1 saat tavlınması ile elde edildiğini gözlemlemişlerdir. XRD analizinde CIS kalkopiritinin keskin piklerini ve CuSe, CuInSe, CuIn₂Se ve In₂Se₃ ikili yapıların pikleri görmüşlerdir. Cu, In ve Se atomlarının düzensiz dağılımını farklı bileşiklerin var olmasına sebep olarak göstermişlerdir. SEM analizinde voltaj ve sıcaklık değeri (-0,5 V, 25 °C’den - 0,6 V, 40 °C) artırıldığında kalınlığın 0,799 µm’den 1,979 µm’ye çıktığı, ortalama parçacık boyutunun ise 32 nm’den 25 nm’ye düştüğünü, CIS ince filminin FTIR soğurma pikinin 2345,28’den 2857,67 cm⁻¹’e yükseldiğini görmüşlerdir [75].

Elektriksel iletken polimerler (ECP) ile polikristal inorganik yarıiletkenler ile oluşturulan fotovoltaiik eklemler günümüzde oldukça popüler bir araştırma alanıdır. Elektrokimyasal depolama ile elde edilen CIS ya da CISE ile elektro polimerleştirme ile elde edilen 3-metil-yofen polimeri arasında oluşturulan fotovoltaiik eklemlerin Schottky bariyerleri bu çalışmalara örnek olarak gösterilebilir. Kois J. ve diğ. bu çalışmalarında elektrokimyasal

depolama yöntemi kullanarak CİSe ince filmlerini cam/ITO/In(O,S) üzerine büyütmüşlerdir [81]. Daha sonra sülfürizasyon ile cam/ITO/In(O,S)/CİSSe yapısını elde etmişlerdir. Organik bileşik (PEDOT-PSS) döndürerek kaplama (spin coating) yöntemiyle cam/ITO/CİSSe tabakasının üzerine 50 nm kalınlığında kaplanmışlardır. Daha sonra Au ile cam/ITO/In(O,S)/CİSSe/PEDOT-PSS üzerine kontak almışlardır. Fotovoltaik hücre son olarak cam/ITO/In(O,S)/CİSSe/PEDOT-PSS/Au halini almıştır. Kois J. ve diğ. bu çalışmalarında Cd temelli fotovoltaik hücrelerin yerine pencere görevi gören organik bileşiklerle fotovoltaik hücre sentezlemeyi amaçlamışlardır. Elde edilen heteroeklemin PV özellik gösterdiği ve $I_{SC} = -12,7 \text{ mA/cm}^2$ ve $V_{OC} = 234\text{mV}$ değerlerini hesaplamışlardır [81].

Yüksek soğurma katsayıları, ayarlanabilir yasak enerji aralıkları, dış etkenlere karşı dirençli olmalarından dolayı CIGSSe, CIGS, CIGSe, CİSe yarıiletken bileşikler fotovoltaik uygulamalarda son zamanlarda öncü bileşikler olarak ön plana çıkmışlardır. Günümüzde CIGS ve onun türevlenebilir varyasyonlarını elde edebilmek için vakum temelli buharlaştırma, sıçratma ile kaplama, kimyasal banyo depolama, metal iyonlarıyla kaplı yüzeye sülfürizasyon ya da selenizasyon, elektrokimyasal kaplama gibi yöntemler kullanılmaktadır. Soğurucu materyal olarak CIGS(Se) yasak enerji aralığı, mikro yapısı ve bileşik özellikleri fotovoltaik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Lee H. ve diğ. bu çalışmada CIGSe ince filmlerini pH, uygulama potansiyeli gibi parametreleri değiştirerek veya kompleks bileşik olarak H_3NSO_3 (sülfamik asit) ve $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ (potasyum hidrojen ftalat) kullanarak tek adımda elektrokimyasal depolama ile elde etmişlerdir. Bu çalışmalarında Lee H. ve diğ. fotovoltaik hücrelerde hayati önem taşıyan pürüzsüz yüzey, tek tip iyi kristallenebilen CIGSe ince filmlerini elektrokimyasal depolamanın uygun şartlarını elde etmeyi amaçlamışlardır [9]. Uygulama voltajının, pH'ın, deney süresinin ve farklı molaritelerde kullanılan destek çözeltilerinin filmlerin yüzey parametrelerini ve kalınlıklarını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir [9].

Günümüzde foton enerjisini dönüştürmekte kullanılan elektriksel iletken polimerlerin (ECP) güneş hücrelerinde ve fotodiyotlarda kullanılması ciddi derecede araştırma konusudur. Düşük maliyet, geniş çalışma alanı ve numunelerin esnek olması daha da dikkat çekici hal almıştır. Birçok ECP sentezlenmesine rağmen polipirrol son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. PPy iyi mekanik özellikleri, elektriksel iletkenlikte istikrarlı olması, kolay sentezlenmesi gibi özelliklerinden dolayı birçok avantaja sahiptir. PPy'nin bu özelliklerinden dolayı inorganik yarıiletkenlerle oluşturulan heteroeklemler ince film

fotovoltaik yapılar için dikkat çekici malzemeler olmuştur. Bereznev S. ve diğ. bu çalışmalarında yüksek kalitede PPy ince filmi ile CİSe ince filmleri ile heteroeklem oluşturmayı ve bu heteroeklemin bazı fiziksel özelliklerini incelemeyi amaçlamışlardır [82]. Bereznev S. ve diğ. elektrokimyasal depolama yöntemi kullanarak cam/ITO/CİSe ve daha sonra bu yapının üzerine PPy'yi yine aynı yöntemi kullanarak kaplamışlardır. Elde edilen heteroeklem üzerine metal kontak (Ag) buharlaştırma ile kaplanmıştır. Fotovoltaik hücre en son halini cam/ITO/CİSe/PPy/Ag sandviç şeklini almıştır. Sonuç olarak CİSe tabakaları ile iyi bir şekilde uyum sağlayıp eklem oluşturabilen yüksek kalitedeki PPy organik bileşiğinin ışıklı ve karanlık ortamdaki durumlarını incelemiş ve belirlemişlerdir. PPy kalınlığının kısa devre foto akım yoğunluğu, açık devre voltajı gibi parametreleri etkilemediğini görmüşlerdir. Elde ettikleri heteroeklemin kısa devre foto akım yoğunluğu, açık devre voltajı değerleri fotovoltaik hücre olarak üretilebilmesinin tercih edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir [82].

2.1.8.3 CİGS inorganik yarıiletken

Bakır (Cu), indiyum (In) ve selenyum (Se) atomlarından meydana gelen CIS bileşiğine galyum (Ga) elementinin eklenmesiyle elde edilen $Cu(In_xGa_{1-x})Se$ dörtlü bileşiği; elverişli yasak enerji band aralığına sahip olması, farklı alttabanlar üzerine kaplanıyor olabilmesi, yüksek soğurma özelliklerinden dolayı öncü yarıiletken bileşikler arasındadır. CİGS içerisinde Ga ve In oranı değiştirilerek bileşiğin yasak enerji band aralığı değiştirilebilir. Yasak enerji band aralığının değişmesi güneş ışığından gelen uygun dalga boyundaki fotonların soğrulma özelliği kazandırabilir. CİGS ince filmleri genelde çok kristalli ince film tabakalarının biriktirilmesiyle elde edilir. Üretim için farklı alt tabanlar kullanılabilir. Bunlar; soda-kireç cam, molibden plaka, ITO (indiyum kalay oksit) kaplı cam, çelik, poliimid gibi malzemelerdir ve bu malzemeler üzerine kaplanan CİGS filmlerinden yüksek verim alınabilmektedir [83].

Bhattacharya R. N. ve diğ. elektro depolama (ED) ve akımsız (EL) kaplama ile CİGS ince filmlerini elde etmişlerdir [84]. Elde edilen filmler Cu ile zenginleştirilmiş, daha sonra In, Ga ve Se ED ve EL metodlarıyla kaplanarak CİGS filmi elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin verimliliğini PVD ile elde edilen filmler ile karşılaştırmışlardır. Ürettikleri heteroeklemlerde sadece CİGS yapısını farklı yöntemlerle üretmişler diğer eklem bileşiklerini sabit tutmuşlardır ve fotovoltaik malzeme en son olarak $MgF_2/ZnO/CdS/CuIn_{1-x}Ga_xSe_2/Mo$ halini almıştır. Elde ettikleri heteroeklemlerin verimliliklerini kıyaslamışlar ve ED metodu ile

kaplanan filmin verimliliğini 15.4, EL metodu ile kaplanan filmin verimliliğini 12.4 ve PVD ile kaplanan filmin verimliliğini 18.8 olarak hesaplamışlardır [84].

Yıldırım H. ve diğ. $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ ince filmlerini sıralı elektrodepolama tekniği kullanarak cam/ITO üzerine büyütmüşlerdir [85]. Bu çalışmada zor ve pahalı metodların yerine vakum gerektirmeyen, düşük maliyetli ve kolay üretilabilen CIGS ince filmlerinin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada Cu, In, Ga ve Se tek bir çözelti içerisinde ITO cam üzerine kaplanmıştır. Ayrıca tavlama sıcaklığının optik, yapısal ve elektriksel özellikler üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kaplama sırasını Cu, In, Cu, Ga, Cu, Se olarak belirlenmiş ve elde ettikleri tabakaları 250, 350, 450, ve 500 °C’de 30 dk tavlamışlardır. Elde ettikleri CIGS filmlerinin XRD analizinde filmlerin polikristal olduğu tespit edilmiştir. Filmlerin taramalı elektron mikroskobu analizinde tavlama sıcaklığına bağlı olarak farklı yüzeysel özellikler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Enerji ayırmalı x-ray analizinde bileşikteki Se oranının tavlama sıcaklığının artması ile %46,99 dan 14,84’e düştüğünü görmüşlerdir. Elde edilen CIGS ince filminin p-tipi yarıiletken ve taşıyıcı yoğunluğunu yaklaşık 10^{16} cm^{-1} tespit etmişlerdir [85].

Sang N. D. ve diğ. bu çalışmalarında CV kullanarak bileşenlerin depolama mekanizmasını incelenmiştir. Ayrıca -0,3 V ile -1,1 V potansiyel aralığında CIGS ince filmleri elde etmeyi ve en iyi depolama potansiyelini bulmayı amaçlamışlardır [7]. CIGS ince filmlerini Ag/AgCl referans elektroda karşı -0,3 V’tan -1,1 V’a kadar değişen potansiyel altında elektrokimyasal depolama yöntemi ile cam/Mo/CaO üzerine depolamışlardır. Filmlerin konsantrasyonları EDS, yüzey morfolojisi ve yapısal özellikleri X-ray ile karakterize edilmiştir. Uygulama potansiyeli ile bileşiklerin varyasyonları CV dataları ile açıklanmıştır ve en uygun potansiyel aralığın -0,8 V ile -1,1 V aralığında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen filmlerin $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$ bileşik formunda olduğu belirlenmiştir. EDS analizi yapıldıktan sonra sitikiometrik olarak istikrarlı olan en iyi filmlerin -0,8 V, -0,9 V ve -1,0 V potansiyel aralığında elde edildiği görülmüştür. XRD analizinde tavlınmamış filmlerin şiddetlerini çok zayıf, -0,3 V, -0,5 V ve -0,9 V potansiyel altında elde edilen filmlerin negatif potansiyel arttıkça piklerin şiddetinin arttığı görmüşlerdir [7].

2.2 İnce Film Analiz Yöntemleri

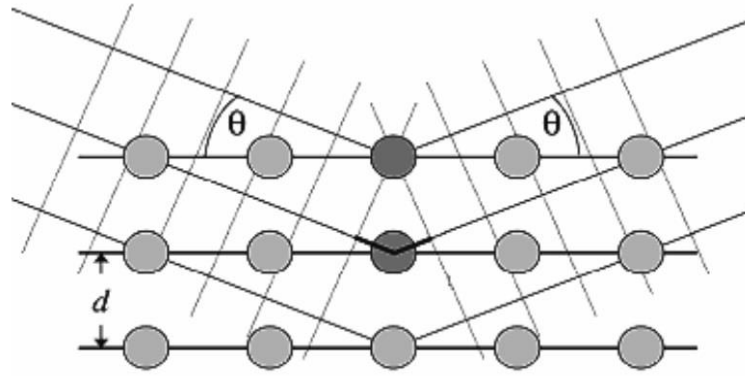
2.2.1 X-Işınları difraksiyonu (XRD)

X-ışınları difraksiyonu Bragg kırınım kanununa dayanan yapı analiz yöntemidir. X-ışınları dalga boyu yapıyı oluşturan atomlar arası mesafe ile yaklaşık aynı mertebede olduğu için

karakterizasyon için oldukça uygundur. Kırınım ve girişim olayına dayanan XRD bize yapı hakkında bilgi verir [86, 87]. X-ışını difraksiyon (XRD) tekniği ile maddenin kristal yapısı, şekli ve boyutu, düzlemler ya da atomlar arası uzaklıklar, tek kristal veya tane yönelimi belirlenebilir. Kristali meydana getiren atomlar üzerlerine gelen X-ışınlarını her yönde saçarlar. Bu saçılmalardan aynı faz farkına sahip ışınlar üst üste gelerek yapıcı girişim (difraksiyon) oluştururken bazıları da birbirlerini yok ederler. Yapıcı girişim yalnızca Bragg denklemini sağlayan geliş açılarında meydana gelir. Bragg denklemi;

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.36)$$

ile verilir. Burada d düzlemler arası mesafe, θ düzleme gelen ve düzlemden yansıyan ışınlarla düzlem arasındaki açı, λ gelen x-ışınının dalga boyu ve n yansıma mertebesidir. $n=0$ değerini alırsa herhangi bir yansıma gözlenmez ve n 'nin en küçük değeri 1 olmalıdır [16]. Aşağıdaki şekil 2.13'te X-ışını difraksiyon şeması verilmiştir.

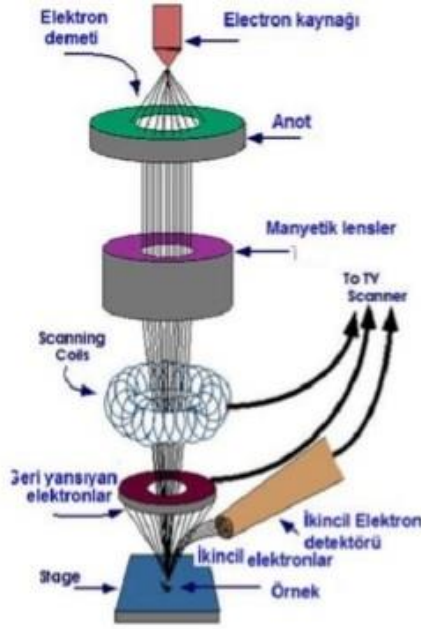


Şekil 2. 13: X-ışını difraksiyon şeması [88].

2.2.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM Manfred von Ardenne tarafından 1930'lu yıllarda keşfedilmiştir. SEM iletken olan tüm materyallerin yüksek çözünürlükte görüntülenmesi için kullanılır. Görüntülemeler hassas olduğu için vakum ortamında çalıştırılır [87, 89]. Çalışma prensibi mikro ya da nano boyutlardaki yüzey üzerine hızlandırılmış elektronların gönderilmesiyle yüzeyin taranmasına dayanır. Elektron kaynağı olarak alan emisyonlu tabanca ya da tungsten kullanılır. Üretilen elektronların zamanla enerjilerinde değişimler meydana gelir bunun önüne geçebilmek için SEM cihazlarında özel mercekler, odaklayıcılar kullanılır ve numune üzerine gönderilen elektronların sabit bir enerji seviyesinde ilerlemesi sağlanır. Numune yüzeyine gönderilen elektronlar analiz edilecek yüzey ile etkileşime girer ve bu etkileşim

sonucunda sinyaller uygun dönüştürücülerle bilgisayara aktarılıp görüntü elde edilir. Şekil 2.14'te SEM cihazının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 2. 14: SEM cihazının şematik gösterimi [90].

2.2.3 Enerji dağılım spektroskopisi (EDS)

EDS fotoelektrik etki prensibini kullanır. Eğer bir kristale X-ışınları veya elektron demeti gönderilirse kristal yüzeyindeki elektronların hareketine sebep olunur. EDS analizinde gelen X-ışınlarının enerjisi meydana gelen elektron-boşluk çiftinin sayısı ile orantılıdır. Elektron mikroskoplarının (SEM, TEM, STEM vb.) çoğu EDS cihazıyla donatılmıştır. EDS sistemi birkaç dakika içerisinde $Z > 11$ atom numaralı elementlerin incelenmesinde hızlı bir yöntem olarak kullanılır. Dedekte edilmiş X-ışınlarından 3 şekilde yararlanılır;

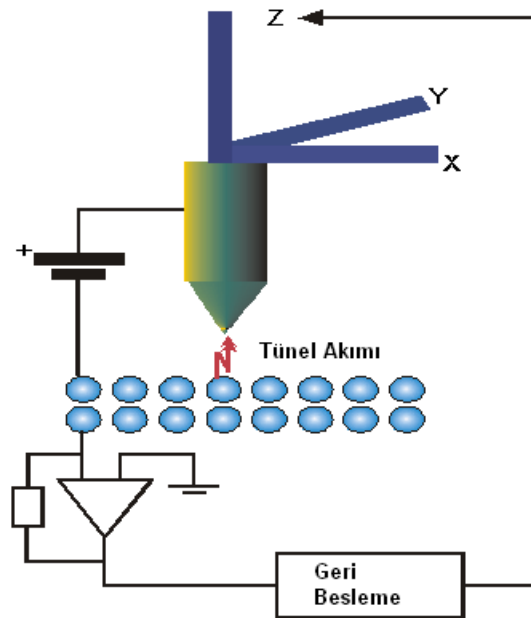
- 1) Elementlerin varlığının belirlenmesi (kalitatif analiz)
- 2) Numune içerisinde var olan elementlerin miktarının belirlenmesi (ağırlık, konsantrasyon, kantitatif analiz)
- 3) Varolan bu elementlerin dağılımının belirlenmesi

X-ışınları analizinde önemli olan “karakteristik” x-ışınlarıdır. Bu “karakteristik” x-ışınları insanoğlunun parmak izi gibi tektir. EDS, elektronları daha yüksek enerjili kabuklara yükseltmek için elektron mikroskopunun elektron demetini kullanır. Kabuk düzenlenmesi her element için tektir. Uyarılmış atomlar x-ışınlarının bir takımını salarak taban durumuna

geçerler. Salınan bu X-ışınları dedekte edilir ve numunenin mikro analizi hakkında bilgi verir.

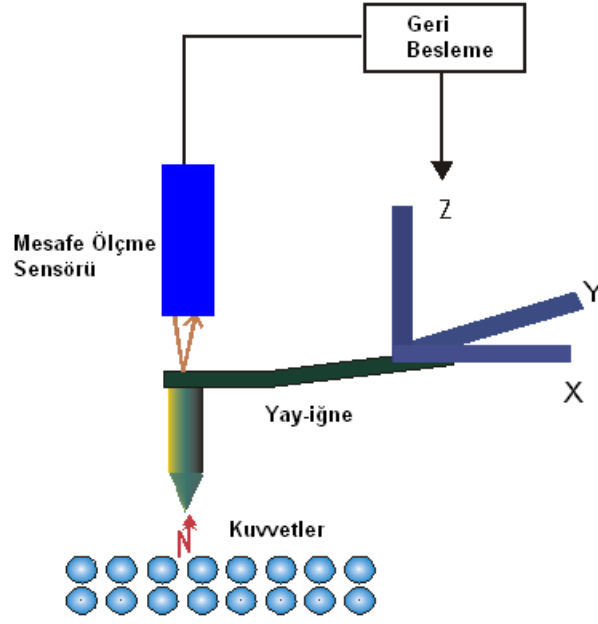
2.2.4 Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Taramalı tünelleme mikroskobu iletken olan yüzeylerin görüntülenmesini başarabilmektedir. Yüzey ile iğne arasındaki mesafeye göre üstel azalma, akımın sadece iğnedeki ve yüzeydeki en yakın atomlar arasında gerçekleştiğini garanti eder. Bu özellik iğne ile yüzey arasındaki mesafeye durağan bir şekilde bağlı olduğundan geri besleme mekanizması basit bir şekilde kontrol edilebilir. Nanoamper seviyesindeki akımın basit bir deneysel düzenele bile az bir gürültü seviyesi ile ölçülebilir. Şekil 2.15'te taramalı tünelleme mikroskobunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 15: Taramalı Tünelleme Mikroskobunun şematik gösterimi [91].

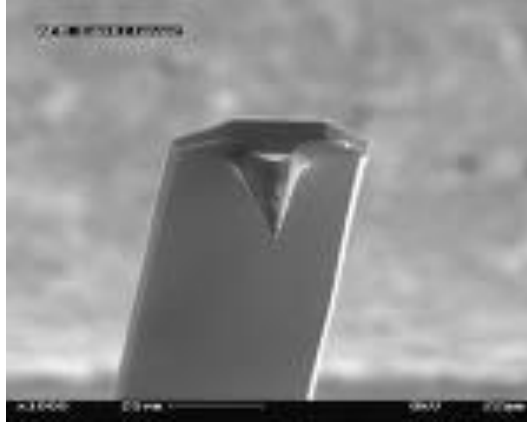
Yalıtkan yüzeylerde de aynı hassasiyette görüntüleme yapabilmek için Binnig ve diğ. taramalı tünelleme mikroskobundan esinlenerek atomik kuvvet mikroskobunu geliştirmişlerdir [92]. AFM'de iğne-yay sistemi yüzeyde pizoelektrik malzeme sayesinde tarama yapar. Tarama pizoelektrik malzemeye verilen voltaj sayesinde olur. Yüzey ve tarama iğnesi arasında yer alan atomlar arası etkileşme kuvveti sebebiyle iğne-yay sisteminde sapmalar meydana gelir. Bu sapmalar optik ya da elektriksel yöntemlerle belirlenir ve daha sonra geri besleme mekanizmasına gönderilir ve görüntü elde edilir. Şekil 2.16'da atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 16: Atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi [91].

AFM'nin en önemli parçası olan iğne-yay sistemi kuvvet sensörü olarak görev yapar ve ölçtüğü kuvvetlerle yüzeyin fiziksel özelliklerini belirler. Taramalı tünelleme mikroskobu (TTM) fermi enerjisi seviyesindeki elektronları görürken AFM fermi enerji düzeyindeki elektron yoğunluklarını görür. Bu da hassasiyet olarak AFM'nin TTM'den daha hassas olduğunu gösterir [93].

AFM'nin çalışmasında iki mod vardır. Bunlar statik mod ve dinamik moddur. Statik modda iğne yüzeye yaklaştırılır ve yüzeyle iğne arasında etkileşim kuvveti oluşması sağlanır. Bu etkileşim kuvvetinin etkisiyle yayda oluşan sapmalar ölçülerek kuvvetin büyüklüğü hakkında bilgi edinilir. Dinamik mod ise harmonik salıncıda olduğu gibi yay-iğne sistemi dış kuvvetin etkisiyle titreştirildiği ve daha sonra iğnenin yüzeye etkileşim yapılması sağlandığı metottur. AFM'de kullanılan iğnenin eğrilik yarıçapı yaklaşık olarak 10 nm civarındadır. Bu iğne uzunluğu 100~200 μm civarında olan bir desteğe (yay) tutturulmuş şekildedir. Elde edilen sonuçların çözünürlüğü etkin iğne boyutuyla, yüzeyden uzaklığıyla ve aradaki etkileşim kuvvetinin mesafeye olan ilişkisiyle değişmektedir. Aşağıdaki şekil 2.17'de iğne-yay sisteminin elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 17: İğne-yay sisteminin elektron mikroskobu görüntüsü [91].

AFM cihazı sayesinde yüzeylerin pürüzlülüğünü belirlemekle birlikte, sıvı ya da katı yüzeylerin nano mertebesinde iki veya üç boyutta yüzey topografisini ve moleküller arası kuvvetleri angstrom mertebesinde 100 mikrona kadar ölçmek mümkündür. Ayrıca AFM cihazı ile malzemelerin yüzeyinin magnetik haritası çıkartılabilir.

2.2.5 UV-Vis spektrofotometresi

Cihazın çalışma esası Lambert-Beer eşitliğine göre moleküllerin tek dalga boylu ışınları absorblamasına dayanır. Lambert-Beer eşitliği;

$$A = \frac{\log I_0}{I} \quad (2.37)$$

ile verilir. Burada A=absorbans, I_0 =Numune üzerine gönderilen ışığın şiddeti, I=Işığın numune içinden geçtikten sonraki şiddetidir. İzlenen yol; ışık kaynağı→monokromatör→örnek →dedektör→kaydedici şeklindedir.

Cihazdan gelen ışık tek dalga boylu hale getirilmek için monokromatördeki kırınım ağından geçer ve ayırıcı özelliği olan aynaya gönderilir. Gelen ışık ayırıcı ayna sayesinde ikiye ayrılır; biri direkt numune üzerine diğeri ise referans numunesi üzerine gönderilir. Referanstan ve numuneden ayrılan ışık uygun algılayıcılar (foto çoğaltıcı, yarıiletken dedektörler) ile algılanarak numunenin optik uyarıma verdiği tepki ölçülür.

2.2.6 I-V karakterizasyonu ve diyot parametrelerinin belirlenmesi

Bir metal yarıiletken kontağa +V gerilimi uygulandığı zaman, yarıiletkendeki elektronların enerjileri -eV kadar azalacağı için yarıiletken tarafındaki engel uygulanan eV kadar azalmış olacaktır. Bu durumda metalden yarıiletkene doğru akan akımda değişiklik olmayacak ancak yarıiletkenden metale doğru akan akımda artış olacaktır. Bu akımdaki artışın miktarı,

uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak çıkmaktadır. Bu durumda yarıiletken tarafından metale doğru akan akımın yönü pozitif kabul edilirse, aşağıdaki formül elde edilir.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2,38)$$

Bu formülde I_0 ; doyma akımı, e ; elektronun yükü, V ; uygulanan potansiyel, n ; idealite faktörü, k ; Boltzman sabiti, T ; sıcaklıktır. Burada görülmektedir ki, yarıiletken tarafından elektronlar kolay geçerken, metal taraftan nispeten zor geçiş olmaktadır. Bu nedenle bu tip kontağa doğrultucu kontak adı verilmektedir.

Temelde kontaklara düz ve ters beslemde potansiyel fark uygulanarak kontağın karakteristiğini gösteren I-V grafikleri elde edilir. Elde edilen bu grafiklerde genelde sağ tarafta düz beslem altında direncin az olduğu ve akımın exponansiyel arttığı, sol tarafta ise direncin yüksek olduğu ve akımın nispeten engellendiği görülür. I-V grafikleri ve bu grafiklerin çeşitli varyasyonları kullanılarak diyotun idealite faktörü, direnci ve engel yüksekliği gibi değerleri bulunur. Bu değerleri bulabilmek için grafiklerin eksen kesim noktaları ile bulunan uyum denklemlerinin eğimlerinden faydalanılır.

İdealite faktörü diyotun ne kadar ideale yakın olduğunu gösteren, boyutu olmayan bir katsayıdır. İdealite faktörü n ile gösterilir ve ideal diyotun n değeri 1 olarak kabul edilir. Fiziki olarak diyotlarda 1'den daha büyük değerler elde edildiği için bu değer 1'e ne kadar yakın olursa diyot o kadar idealdir. İdealite faktörü n 'yi bulabilmek için termioyonik emisyon teorisinde göre elde edilen akım ve gerilim değerlerinden yola çıkmak uygun olur.

Denklem 2,38'de oluşan I akımının gerilim ile birlikte eksponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Bununla beraber I akımının, sıfır beslemde oluşan ve zıt yönlü olarak birbirlerini yok eden I_0 akımlarının da katsayısı olarak arttığı görülmektedir. Denklem 2,38'deki -1 değeri sıfır beslemde ters yönlü oluşan akım değerini göstermektedir ancak doğru yönde uygulanan besleme gerilimi belirli büyüklükte ise bu -1 ile ifade edilen ters yönlü oluşan akımın değeri ihmal edilebilecek kadar küçük kalır. Düz besleme olarak $eV \gg 3kT$ değerini sağlayacak kadar besleme gerilimi uygulandığında denklem 2,38'deki bu -1 terimi ihmal edilir. Bu durumda 2,38 denklemi aşağıdaki şekle sadeleşir:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) \right] \quad (2,39)$$

Yalnız bırakılmak istenilen n değeri üssel ifadesi içinde olduğundan her iki tarafın logaritması alınıp, sabit değerlerden kurtulmak için denklem 2,39'un her iki tarafının V 'ye göre türevi alınırsa, idealite denklemi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (2,40)$$

Diyot toplam direnci, diyotun düz besleme bölgesinde yüksek gerilim uygulandığında akıma karşı gösterdiği doğrusallığa yaklaşan direnç olarak tanımlanır. Logaritması alınmamış I-V grafiği incelendiğinde toplam direncin artan gerilimle birlikte azaldığı görülmektedir. Grafikteki bükülme daha büyük gerilimlerde düz bir eğim halini alır, bu eğim diyodun toplam direncini gösterir. Diyodun kullanılması planlanan gerilim aralığında I-V grafiğinin eğimi bulunursa, kullanım bölgesindeki yaklaşık direnç değeri elde edilir.

Tek bir I-V ölçümü değerleri kullanılarak diyot parametreleri Cheung fonksiyonları yardımı ile de hesaplanabilir. Bu yöntemde I-V ölçümlerinin düz beslem kısmı kullanılır. Yine temel olarak termoiyonik emisyon teorisi denkleminde yola çıkılmıştır.

$$I = A \cdot A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{bp}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2,41)$$

Richardson denkleminde A; sabit, A^* ; Richardson sabiti, T; sıcaklık, e; elektronun yükü, ϕ_{bp} ; engel yüksekliği, V; uygulanan gerilim, k; Boltzman sabitidir ve görülen gerilim ifadesi diyota uygulanan toplam gerilimi göstermektedir. Halbu ki bu uygulanan gerilimin bir kısmı seri direnç üzerine düşerken bir kısmı ise kontak bölgesinde bulunmaktadır. Dolayısıyla bu gerilim ifadesini kısımlara ayırmamız gerekir.

$$I = [A \cdot A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{bp}}{kT}\right)] \left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1\right] \quad (2,42)$$

Denklem 2,42'ye IR_s ifadesinin eklenmesiyle seri direnç üzerine düşen gerilim ifade edilmiş olur. Denklem 2,42'de, gerilim ifadesi üssel fonksiyonun içerisinde ve bu üssel fonksiyonunun dışına çıkarmak için, denklemin iki tarafında logaritması alınır.

$$\ln I = \ln(A \cdot A^* T^2) - \frac{e\phi_{bp}}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (2,43)$$

ve bu denklem gerilim için çözüldüğünde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_{bp} + IR_s \quad (2,44)$$

Denklemden $n\phi_{bp}$ terimini yok etmek için $\ln I$ 'ya göre her iki tarafın türevi alınır;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2,45)$$

elde edilir. Bu denklemde de, $dV/d(\ln I)$ 'nın I'ya göre lineer olduğu görülebilir. Bu benzetmede denklem 2,45'in eğimi R_s seri direncini verecektir. Denklemin düşey y eksenini kestiği noktadan ise denklemde görülen nkT/e sabitinin değeri bulunabilir. Bu bulunan

değerde k, T ve e değişkenleri sabit bilinenlerdir ve bulunan değerde yerlerine konularak n idealite sabiti değeri hesaplanır.

2.3 İnce Film Üretme Yöntemleri

2.3.1 Fiziksel buhar biriktirme

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi vakum altında ince film üretme yöntemlerinden biridir. Bu metotta farklı fiziksel yöntemlerle hedef malzeme kaplanmak istenen alt taş üzerine ince film şeklinde biriktirilir [87]. Fiziksel buhar biriktirme yönteminde katı ya da sıvı formda olan hedef malzemenin vakum ortamında atomlar ya da moleküller halinde buharlaştırılmasıyla kaplanacak alt taş yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturma sürecidir [94, 95].

Bu süreç üç adımda meydana gelmektedir:

1. Kaplanacak katı ya da sıvı formdaki malzemenin buhar fazda oluşturulması.
2. Kaplanacak malzemenin kaplama yapılacak yüzeye ulaşması.
3. Kaplanacak yüzey üzerinde film tabakasının oluşması.

Bu yöntem yüksek vakum ortamında gerçekleştirilmektedir. Öyle ki 1cm^3 'lük standart gaz hacminde yaklaşık 10^{19} molekül bulunmaktadır. Vakum arttığında bu hacimdeki gaz molekülü sayısı azalmaktadır. Orta vakumda (0.1 Pa) bu sayı 10^{13} iken yüksek vakumda 10^{10} ve ultra yüksek vakumda 10^4 'tür [94, 96].

Fiziksel buhar biriktirme yönteminde yüksek vakum oluşturulmasının nedeni ortamdaki kirlilik atomlarının uzaklaştırılmasının yanı sıra buharlaşan malzeme atomlarının ya da moleküllerinin ortamda bulunan diğer atom ya da moleküllerle çarpışmasını en aza indirmektir [94].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi dört farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar termal buharlaştırma, iyon kaplama, ark buhar biriktirme ve sputter biriktirmedir.

2.3.1.1 Termal buharlaştırma

Termal buharlaşma kaplanacak malzemenin alt taş ile kaynak arasındaki ortamda herhangi bir çarpışma meydana gelmeden, lineer bir şekilde kaplanacak yüzeye ulaşması sürecidir. Genellikle termal buharlaşma 10^{-3} - 10^{-7} Pa (1 torr=133,322 Pa) arasında gerçekleşmektedir. Buharlaştırma kaynağı, elektrik akımıyla ısıtılan eritme haznesi, pota veya tel ya da hedef malzeme üzerine odaklanmış yüksek enerjili elektron ışınlarından faydalanılmaktadır. Buharlaştırma kaynakları katı ya da sıvı formdaki kaplama malzemesini buhar faza çevirme

şekillerine göre de sınıflandırmaktadır. Kaplanacak malzemenin durumuna göre kaplamada kullanılacak kaynaklarda farklı olmalıdır. Çünkü buharlaştırılan malzeme ile buharlaştırma kaynağı arasında reaksiyon oluşumu safsızlık atomlarının meydana gelmesine sebep olur ve bu istenmeyen bir durumdur. Kaynak ile buharlaştırılacak malzemenin yüksek sıcaklıkla beraber birbiri içerisine çözünmesi de kaynağın bozulması gibi durumlara sebep olur [94, 95].

Termal buharlaştırma metodu ile pek çok malzeme buharlaştırılabilir ve ince bir film katmanı şeklinde alt taş üzerine yoğunlaştırılabilir. Alt taş farklı malzemelerden seçilebilir ve kaplama esnasında sıcaklığının sabit tutulması gerekir. Vakum ortamında sıcaklık oldukça düşüktür ve bu alt taş üzerinde oluşabilecek oksitlenmelerin önüne geçmektedir [94].

Buharlaştırma içinde en çok kullanılan teknikler rezistanslı ısıtma, yüksek enerjili elektron ışıma, düşük enerjili elektron ışıma ve radyo frekansıdır.

Bu çalışmada kullanılan teknik fiziksel buhar biriktirme altında termal buharlaştırma tekniği içerisinde rezistanslı ısıtma yöntemidir. Rezistanslı ısıtma yöntemi; 1500 °C'nin altında buharlaşan malzemelerin buharlaştırılmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Temeli içinden akım geçirilerek ısıtılan bir yüzeyle kaplanacak malzemenin temas ettirilmesi ile buharlaştırılmaya dayanır. Kaplanacak malzemenin özelliğine göre kaynak olarak tel sepet, tel hazne ya da eritme haznesi kullanılabilir. Genelde kaynak olarak kullanılan malzemelerin erime noktalarının ve dirençlerinin oldukça yüksek olması gerekir. Yaygın kullanılan kaynaklara tungsten, molibden, tantal, karbon ve kompozit seramikler örnek olarak verilebilir.

Örneğin Cu metali molibden ve tungsten kaynak kullanılarak buharlaştırılırken Cu_2O bileşiği tantal kaynak kullanılarak buharlaştırılır. Bir başka örnek ise Al sadece tungsten tel sepet ile buharlaştırılırken, B sadece karbon eritme haznesi kullanılarak buharlaştırılır [97].

Fiziksel buhar biriktirme yönteminin avantajları şunlardır:

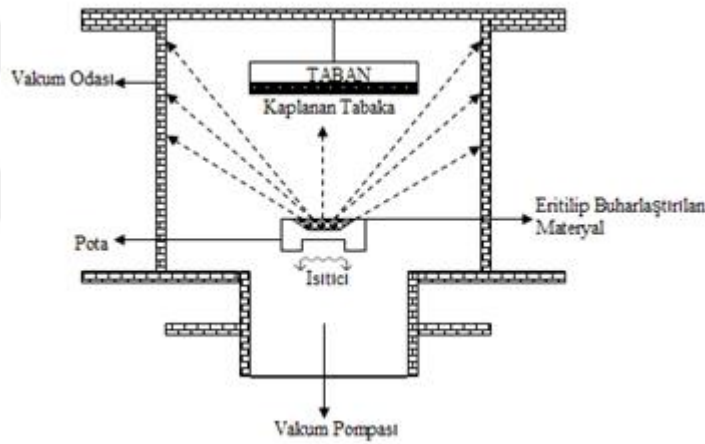
- Yüksek saflıkta kaplanacak malzeme kullanılarak yüksek saflıkta kaliteli filmler üretilir.
- Kaynak malzemenin yüksek saflıkta olması, üretim öncesi herhangi bir işleme tabi tutulmaması bu yöntemin avantajlarından.
- Taban üzerine maske uygulanarak film oluşum bölgelerinin belirlenmesine olanak sağlar.

- Çökeltme hızı, takibi ve kontrolü nispeten kolaydır.
- Ucuz üretim tekniklerinden biridir.

Fiziksel buhar biriktirme yönteminin dezavantajları ise şunlardır:

- Yüksek hacimli vakum bölmelerinde kaynak malzeme ve taban arasında belirgin bir uzaklık olması gerekir.
- Film özelliklerini kontrol etmek için sınırlı sayıda işlem değişkeni vardır.
- Düzgün sabitleme yapılmadığında veya kaynak ve alt taş arası mesafe uygun seçilmediğinde kötü yüzey kaplamaya ve düzensiz film kalınlığına neden olur.
- Birçok bileşik ve alaşımlar güçlükle oluşturulabilir.

Şekil 2.18’de fiziksel buhar biriktirme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



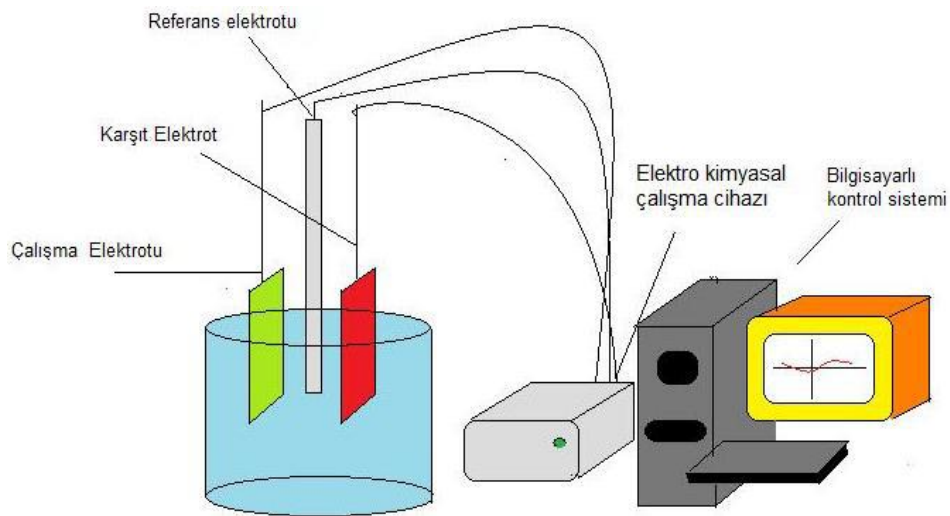
Şekil 2. 18: Fiziksel buhar biriktirme yönteminin şematik gösterimi [98].

2.3.2 Elektrokimyasal kaplama yöntemi

Kimyasal reaksiyonların elektrik üretiminde, elektriğinde kimyasal reaksiyonlarda kullanımıyla ilgili olan elektrokimya kimyanın bir dalıdır. Elektrokimya içinde elektrolit çözeltilerin iletkenliği ve termodinamiği yanında elektriksel ve kimyasal enerjilerinin birbirine dönüşümleri de incelenir. Elektrokimyasal teknikler, kimyasal bir sistemden elektrik sinyali üretme yolunu sağladıkları için derişimin izlenmesinde elektronik aletleri kullanmamızı sağlarlar. Elektrokimyanın pratik uygulamaları oldukça fazladır. Bu uygulamalar elektrik güç kaynakları olarak yakıt hücreleri ve hücrelerin yapımı, başlıca kimyasalların üretimi, metallerin arıtımı ve korozyon kontrolünün düzenlenmesi gibi geniş bir alana yayılmıştır. Elektrokimyanın kuramsal uygulamaları da önemlidir. Çünkü elektrik bir elektron akışını gerektirdiğinden, kimya ile elektrik arasındaki ilişkiyi incelemek,

elektronların aktarıldığı yükseltgenme-indirgenme tepkimelerinin içyüzünü kavramamıza yardımcı olur [99]. Elektrik ile kimya arasındaki ilişkiyi incelemek, elektronların transfer edildiği indirgenme-yükseltgenme reaksiyonlarının içyüzünü kavrayabilmek elektrokimyanın kuramsal temellerinin önemini ortaya çıkarır [99, 100]. Elektrokimyasal kaplama oldukça büyük metal yüzeylerin kaplanmasından endüstriyel alanlara, yarıiletken malzemelerin sentezlenmesinden mikroçiplerin yüzeylerinin kaplanmasına kadar geniş bir perspektif sunar [100, 101]. Bu nedenle yarıiletken malzemelerin elektrokimyasal olarak büyütülmesi endüstriyel açıdan da önem arz etmektedir [102].

Elektrik akımı yardımı ile kimyasal dönüşümlerin sağlandığı elektron alışverişine dayanan işlemler, elektrokimyasal hücrelerde gerçekleştirilir. Analiz edilecek madde, çözücü, destekleyici elektrolit, elektrotlar ve bu elektrotların bağlandığı potansiyostat olarak adlandırılan bir dış devre elektrokimyasal hücreyi oluşturan kısımlardır. Elektrokimyasal bir reaksiyon, iki elektrotlu veya üç elektrotlu hücrelerde yapılabilir. İki elektrotlu hücrelerde elektroaktif maddelerin indirgenme ve yükseltgenme potansiyeli belirlenemediğinden ve potansiyel kontrollü yapılamadığından dolayı elektrokimyasal çalışmalarda genellikle üç elektrotlu sistemler tercih edilir. Üç elektrotlu hücrelerde, çalışma elektrotunun potansiyeli referans elektroda göre belirlendiği için reaksiyonun her safhasında elektrot potansiyeli bilinen bir değere sahiptir. Bu tür elektrokimyasal hücrelerde karşıt, çalışma ve referans elektrot, içinde elektroaktif tür ile destekleyici elektroliti içeren bir çözücü içerisine daldırılmıştır [100]. Şekil 2,19’da üç elektrotlu elektrokimyasal hücrenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 19: Üç elektrotlu elektrokimyasal kaplama sisteminin şematik gösterimi [100].

Çalışma elektrodu zamanla analit derişimindeki değişimlerle potansiyeli doğrusal olarak değişen elektrottur. Çalışma elektrodu, üzerinde elektrokimyasal tepkimenin gerçekteştiği elektrottur. Yükseltgenme veya indirgenme reaksiyonu bu elektrot üzerinde gerçekteşir ve çalışma elektrodu seçilirken yüzey özellikleri ve aktivitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Düz bir plaka, tel ya da helezon haline getirilmiş tel formundaki karşıit elektrot elektriğin kaynaktan gelerek çözücü içinden çalışma elektroduna aktarılmasını sağlar. Devreyi tamamlamak aslı görevidir. Çalışma elektroduna herhangi bir etkisi yoktur. Genelde karşıit elektrot olarak platin, altın, karbon ve metal oksitler kullanılmaktadır.

Referans elektrot potansiyeli tam olarak bilinen elektrottur. Çalışılan çözeltide bulunan analitin veya diğer iyonların konsantrasyonundan bağımsızdır ve bu sebeple potansiyeli deney süresince sabit kalır. Bu elektrodu içeren gerilim okuma devresinin giriş direnci çok yüksek olduğundan bu elektrottan hiç akım geçmez. Yani tüm akım karşıit elektrottan çalışma elektroduna doğru akar. Genelde kullanılan referans elektrotlar, Ag/AgCl elektrot, Hg/HgCl₂ (kalomel) elektrot ve standart hidrojen elektrot (SHE) tur. Referans elektrot, çalışma elektrodunun potansiyelini ölçer, reaksiyon ile hiçbir ilgisi yoktur. İndirgenme ve yükseltgenme potansiyellerinin tam olarak belirlenebilmesi, bağlantılardaki ve çözelti içindeki potansiyel kaybının ve ayrıca çözelti direncinin etkisiz kılınması için referans elektrot kullanılmalıdır.

Çözücü elektrolit elektrokimyada, incelenecek maddeyi çözebilecek kadar yüksek dielektrik sabitine, yüksek elektriksel iletkenliğe ve çok yüksek saflığa sahip çözücüler tercih edilir. Aynızamanda kullanılacak bu çözücünün çalışılan potansiyelde inert olması yani çalışılan aralıkta reaksiyona girmemesi gerekir. Bu durum iletken tuz içinde geçerlidir. Çözücünün bu derece önemli olması nedeniyle, elektrokimyasal çalışmalardan önce detaylı bir şekilde çözücünün fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmalıdır.

Elektrokimyasal kaplamanın avantajları şunlardır:

- Hızlı bir şekilde kaplama yapılır
- Bilindik kaplama yöntemlerine nazaran daha kalın ince filmler elde edilebilir
- Ucuz bir yöntemdir.
- Pahalı ekipmanlara ihtiyacı yoktur.
- Vakum ortamı gerektirmez.
- Çevrecidir, doğaya çok ciddi zararlar vermez.

- Zaman, akım ve potansiyel, çalışma elektrodu cinsi ve yüzey geometrisi kontrol edilebildiğinden parametreler değiştirilip farklı yüzey özelliklere sahip ince filmler üretilebilir [100].

Elektrokimyasal kaplamanın dezavantajları şunlardır:

- Tamamen homojen ince filmler üretilmeyebilir.
- Uygun potansiyel ya da süre seçilmediğinde çalışma elektrodu ile kaplanan malzeme arasında sıyrılmalar meydana gelebilir.
- Film kalınlıkları homojen olmayabilir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

InSe, CIS ve CIGS bileşiklerinin cam/ITO alt tabanı üzerine tek adımda elektrokimyasal kaplama ile elde edilebilmesi için gerekli öncüler; alt tabanların hazırlanması, öncü çözeltilerin hazırlanması ve deney parametrelerinin belirlenmesi olarak sıralanabilir. Belirlenen parametreler yapılan literatür taramaları sonuçları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Elektrokimyasal kaplama için Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Autolab marka PGSTAT128N model elektrokimyasal empedans spektroskopisi cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.1'de Autolab marka PGSTAT128N model elektrokimyasal empedans spektroskopisi cihazının resmi verilmiştir.



Şekil 3. 1: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi cihazı [103].

Cam/ITO/InSe/rubrene, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene, cam/ITO/CIS/rubrene, cam/ITO/CIS(tav)/rubrene, cam/ITO/CIGS/rubrene, cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ve cam/ITO/InSe/coronene, cam/ITO/InSe(tav)/coronene, cam/ITO/CIS/coronene, cam/ITO/CIS(tav)/coronene, cam/ITO/CIGS/coronene, cam/ITO/CIGS(tav)/coronene heteroeklemlerinin termal buharlaştırma ile kaplama yöntemi kullanılarak elde edilebilmesi için uygun potanın belirlenmesi, uygun sıcaklık ve basınç değerinin belirlenmesi, alt taban ile pota arasındaki mesafenin belirlenmesi olarak sıralanabilir.

Termal buharlaştırma ile kaplama için Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Vaksis marka PVD-MT/2M2T termal

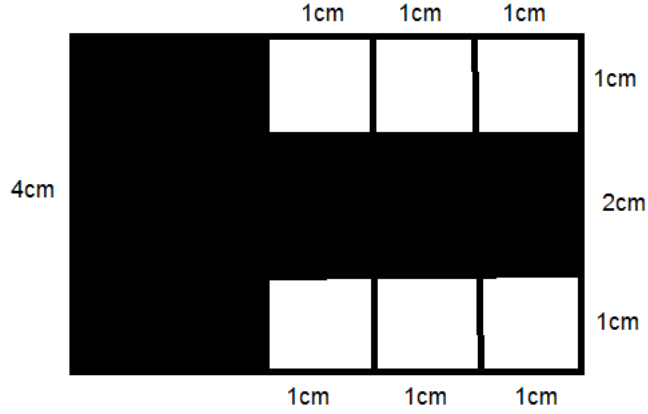
buharlaştırma ince film kaplama sistemi kullanılmıştır. Şekil 3.2’de Vaksis marka PVD-MT/2M2T termal buharlaştırma ince film kaplama sisteminin resmi verilmiştir.



Şekil 3. 2: Termal buharlaştırma ince film kaplama sistemi [104].

3.1 Cam/ITO Alt Tabanlarının Hazırlanması

4x5 cm ebatındaki cam/ITO alt tabanı ilk önce ultra saf sudan geçirildi. Daha sonra 250 ml’lik cam behere sabunlu su çözeltisi hazırlandı, alt taban bu çözelti içerisinde yerleştirildi ve ultrasonik banyoya 10 dk bırakıldı. 10 dk sonra alt taban çözelti içerisinde çıkarılıp ultra saf su ile iyice durulandı. Durulanan alt taban cam beherde sıvı aseton içerisinde yerleştirildi ve 10 dk ultrasonik banyoya bırakıldı. Asetonla temizlik işlemi bittikten sonra alt taban cam beherde propanol içerisinde yerleştirildi ve 10 dk ultrasonik banyoya bırakıldı. Propanol ile temizlik işlemi bittikten sonra alt taban yüzeyi azot gazı ile kurutuldu. Büyütülen filmlerin kalınlıklarının daha iyi belirlenebilmesi ve eşit kaplama yüzey alanına sahip filmler elde edilebilmesi için cam/ITO alt tabanı maskeleme işlemi yapılarak 1cm² yüzey alanına sahip 6 adet yüzeye ayrıldı. Maskeleme işlemi sürtünme katsayısı düşük, yalıtkan, yüksek ve düşük (-250, +260 °C) sıcaklıklara dayanıklı, uygulandığı yüzeye yapışmayan, kimyasallardan etkilenmeyen PTFE teflon bant ile yapıldı. Şekil 3.3’te maskeleme işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Maskenin uygulandığı bölgeler siyah ile renklendirilmiştir.



Şekil 3. 3: Maskeleme işleminin şematik gösterimi.

3.2 InSe İnce Filmlerinin Elde Edilmesi

In kaynağı olarak 25 mM InCl_3 (sigma aldrich %99,999), Se kaynağı olarak 25 mM $\text{H}_2\text{O}_3\text{Se}$ (sigma aldrich %98), elektrolit çözeltisinin iletkenliğini artırmak için 250 mM LiCl (sigma aldrich %99) ve 350 mM KCl (sigma aldrich %99) kullanıldı.

Tek adımda elektrokimyasal kaplama reaksiyonu için tüm çözeltilerden 17,5 ml kullanılarak elektrolit miktarı 70 ml olarak ayarlandı. Elektrolit çözeltisinin pH'ı %30'luk, 9,45 M HCl kullanılarak 1,5'e ayarlandı ve uygulama voltajı -0,9 V olarak belirlendi. Karşıt elektrot olarak 1,0x1,5 cm ebatında Pt plaka, referans elektrot olarak Ag/AgCl referans elektrodu ve çalışma elektrodu olarak 6 cm^2 yüzey alanına sahip cam/ITO kullanıldı. Reaksiyon oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve reaksiyon süresi 60 dk olarak belirlendi. Reaksiyon süresince reaksiyonun gerçekleştiği hücre içerisinden 0,1 bar N_2 gazı geçirildi.

3.3 CIS İnce Filmlerinin Elde Edilmesi

Cu kaynağı olarak 5 mM CuCl_2 (sigma aldrich %99,999), In kaynağı olarak 5 mM InCl_3 (sigma aldrich %99,999), Se kaynağı olarak 10 mM $\text{H}_2\text{O}_3\text{Se}$ (sigma aldrich %98), elektrolit çözeltisinin iletkenliğini artırmak için 250 mM LiCl (sigma aldrich %99) ve 350 mM KCl (sigma aldrich %99) kullanıldı.

Tek adımda elektrokimyasal kaplama reaksiyonu için tüm çözeltilerden 14 ml kullanılarak elektrolit miktarı 70 ml olarak ayarlandı. Elektrolit çözeltisinin pH'ı %30'luk, 9,45 M HCl kullanılarak 1,9'a ayarlandı ve uygulama voltajı -0,7 V olarak belirlenmiştir. Karşıt elektrot olarak 1,0x1,5 cm ebatında Pt plaka, referans elektrot olarak Ag/AgCl referans elektrodu ve çalışma elektrodu olarak 6 cm^2 yüzey alanına sahip cam/ITO kullanıldı. Reaksiyon oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve reaksiyon süresi 20 dk olarak belirlendi. Reaksiyon süresince reaksiyonun gerçekleştiği hücre içerisinden 0,1 bar N_2 gazı geçirildi.

3.4 CIGS İnce Filmlerinin Elde Edilmesi

Cu kaynağı olarak 5 mM CuCl₂ (sigma aldrich %99,999), In kaynağı olarak 5 mM InCl₃ (sigma aldrich %99,999), Ga kaynağı olarak 5 mM GaCl₃ (sigma aldrich %99,999), Se kaynağı olarak 10 mM H₂O₃Se (sigma aldrich %98), elektrolit çözeltisinin iletkenliğini artırmak için 250 mM LiCl (sigma aldrich %99) ve 350 mM KCl (sigma aldrich %99) kullanıldı.

Tek adımda elektrokimyasal kaplama reaksiyonu için tüm çözeltilerden 12 ml kullanılarak elektrolit miktarı 72 ml olarak ayarlandı. Elektrolit çözeltisinin pH'ı %30'luk, 9,45 M HCl kullanılarak 2'ye ayarlandı ve uygulama voltajı -1,0V olarak belirlendi. Karşıt elektrot olarak 1,0x1,5 cm ebatında Pt plaka, referans elektrot olarak Ag/AgCl referans elektrodu ve çalışma elektrodu olarak 6 cm² yüzey alanına sahip cam/ITO kullanıldı. Reaksiyon oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve reaksiyon süresi 60 dk olarak belirlendi. Reaksiyon süresince reaksiyonun gerçekleştiği hücre içerisinden 0,1 bar N₂ gazı geçirildi.

3.5 InSe, CIS ve CIGS İnce Filmlerinin Tavlanması

Tavlama işlemi Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan MAGMA TERM marka MT1307-B2 model kül fırınında gerçekleştirilmiştir.

3.5.1 Cam/ITO/InSe ince filmlerinin tavllanması

Tavlama sıcaklığı atmosfer ortamında 100 °C, tavlama süresi 1 saat olarak belirlendi. Oda sıcaklığında bulunan fırının sıcaklığı dakikada 10 °C artacak şekilde ayarlandı, bekleme süresi sıcaklık 100 °C'ye ulaştığında 1 saat olarak belirlendi ve bekleme süresi bittikten sonra filmler fırından çıkarılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı.

3.5.2 Cam/ITO/CIS ince filmlerinin tavllanması

Tavlama sıcaklığı atmosfer ortamında 500 °C, tavlama süresi 1 saat olarak belirlendi. Oda sıcaklığında bulunan fırının sıcaklığı dakikada 10 °C artacak şekilde ayarlandı, bekleme süresi sıcaklık 500 °C'ye ulaştığında 1 saat olarak belirlendi ve bekleme süresi bittikten sonra filmler fırından çıkarılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı.

3.5.3 Cam/ITO/CIGS ince filmlerinin tavllanması

Tavlama sıcaklığı atmosfer ortamında 500 °C, tavlama süresi 1 saat olarak belirlendi. Oda sıcaklığında bulunan fırının sıcaklığı dakikada 10 °C artacak şekilde ayarlandı, bekleme

süresi sıcaklık 500 °C'ye ulaştığında 1 saat olarak belirlendi ve bekleme süresi bittikten sonra filmler fırından çıkarılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı.

3.6 Cam/ITO/InSe-InSe(tav)-CIS-CIS(tav)-CIGS-CIGS(tav)/rubrene Heteroeklemlerinin Elde Edilmesi

Toz halindeki rubrenenin ($C_{42}H_{28}$) cam/ITO/InSe, cam/ITO/InSe(tav), cam/ITO/CIS, cam/ITO/CIS(tav), cam/ITO/CIGS ve cam/ITO/CIGS(tav) alt tabanları üzerine termal buharlaştırma ile kaplama deneyinde Mo(molibden) pota kullanıldı. Mo pota propanol ile temizlendi ve deneye başlamadan önce ısıtılarak üzerindeki kirliliklerden arındırıldı. Pota ile alt tabanlar arası mesafe yaklaşık 10 cm olarak belirlendi. Kaplama 26 °C kazan sıcaklığında ve $2,5 \times 10^{-6}$ torr basınç değerinde gerçekleştirildi.

3.7 Cam/ITO/InSe-InSe(tav)-CIS-CIS(tav)-CIGS-CIGS(tav)/coronene Heteroeklemlerinin Elde Edilmesi

Toz halindeki coronene'nin ($C_{24}H_{12}$) cam/ITO/InSe, cam/ITO/InSe(tav), cam/ITO/CIS, cam/ITO/CIS(tav), cam/ITO/CIGS ve cam/ITO/CIGS(tav) alt tabanları üzerine termal buharlaştırma ile kaplama deneyinde Mo (molibden) pota kullanıldı. Mo pota propanol ile temizlendi ve deneye başlamadan önce ısıtılarak üzerindeki kirliliklerden arındırıldı. Pota ile alt tabanlar arası mesafe yaklaşık 10 cm olarak belirlendi. Kaplama 25 °C kazan sıcaklığında ve $4,7 \times 10^{-6}$ torr basınç değerinde gerçekleştirildi.

3.8 Analizlerde Kullanılan Cihazlar

3.8.1 XRD analizi

Üretilen materyallerin XRD analizi Giresun Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde GNR marka Europe model toz XRD cihazı ile yapıldı. Şekil 3.4'te GNR marka Europe model toz XRD cihazı verilmiştir.



Şekil 3. 4: GNR marka Europe model toz XRD cihazı [105].

3.8.2 SEM analizi

Üretilen materyallerin SEM analizleri Ordu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda HİTACHI marka SU 1510 model SEM cihazı ile yapıldı. Şekil 3.5'te HİTACHI marka SU 1510 model SEM cihazı verilmiştir.



Şekil 3. 5: HİTACHI marka SU 1510 model SEM cihazı [106].

3.8.3 EDS analizi

Üretilen materyallerin EDS analizleri Ordu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda HİTACHI marka SU 1510 model SEM cihazına entegre sistem ile yapıldı.

3.8.4 AFM analizi

Üretilen materyallerin AFM analizleri Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde NANOSURF marka C3000 model AFM cihazı ile

yapılmıştır. Aşağıdaki şekil 3.6’da NANOSURF marka C3000 model AFM cihazı verilmiştir.



Şekil 3. 6: NANOSURF marka C3000 model AFM cihazı [107].

3.8.5 UV-VİS analizi

Üretilen materyallerin UV-VİS analizleri Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde Thermo SCIENTIFIC marka Thermo Scientific evolution Array model UV-VİS spektrometre cihazı ile yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.7’de Thermo SCIENTIFIC marka Thermo Scientific Evolution Array model UV-VİS spektrometre cihazı verilmiştir.



Şekil 3. 7: Thermo SCIENTIFIC marka Thermo Scientific Evolution Array model UV-VİS spektrometre cihazı [108].

3.8.6 I-V ve güneş similatörü analizi

Üretilen materyallerin I-V ve güneş similatörü analizleri Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde SCIENCETECH marka Solar

Simulator AAA model güneş simülatörü sistemi ile yapılmıştır. Şekil 3.8’de SCIENCETECH marka Solar Simulator AAA model güneş simülatörü cihazı verilmiştir.



Şekil 3. 8: SCIENCETECH marka Solar Simulator AAA model güneş simülatörü cihazı [109].

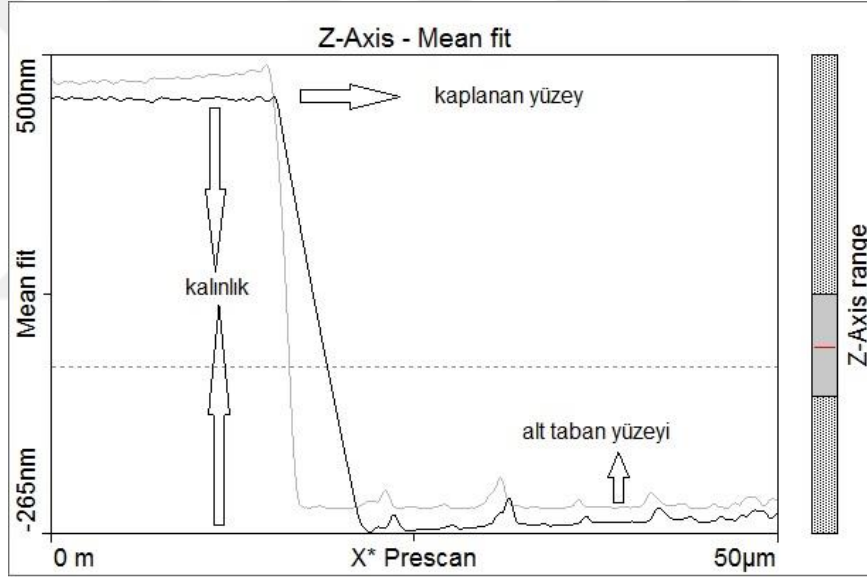
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1 Filmlerin Kalınlıklarının Belirlenmesi

Filmlerin kalınlıkları maskeleme yöntemi kullanılarak AFM cihazı ile belirlendi. Kaplama yapılmadan önce alt taban teflon bant ile maskelendi, kaplama yapıldıktan sonra teflon bant söküldü ve kaplanan yüzey ile kaplanmayan yüzey arasında bariz bir kalınlık farkı meydana geldi. Şekil 4.1’de kalınlığın nasıl belirlendiği gösterilmiştir. Kalınlık belirlenirken film yüzeyinin üç ayrı bölgesinin kalınlığının ortalaması alındı. Örneğin; filmin alt kısmının kalınlığı 420 nm, orta kısmının kalınlığı 415 nm ve üst kısmının kalınlığı 413 nm ise;

$$kalınlık = \frac{420 \text{ nm} + 415 \text{ nm} + 413 \text{ nm}}{3} = 416 \text{ nm} \quad (4.1)$$

olarak belirlendi.



Şekil 4. 1: Filmlerin kalınlıklarının belirlenmesinin gösterimi.

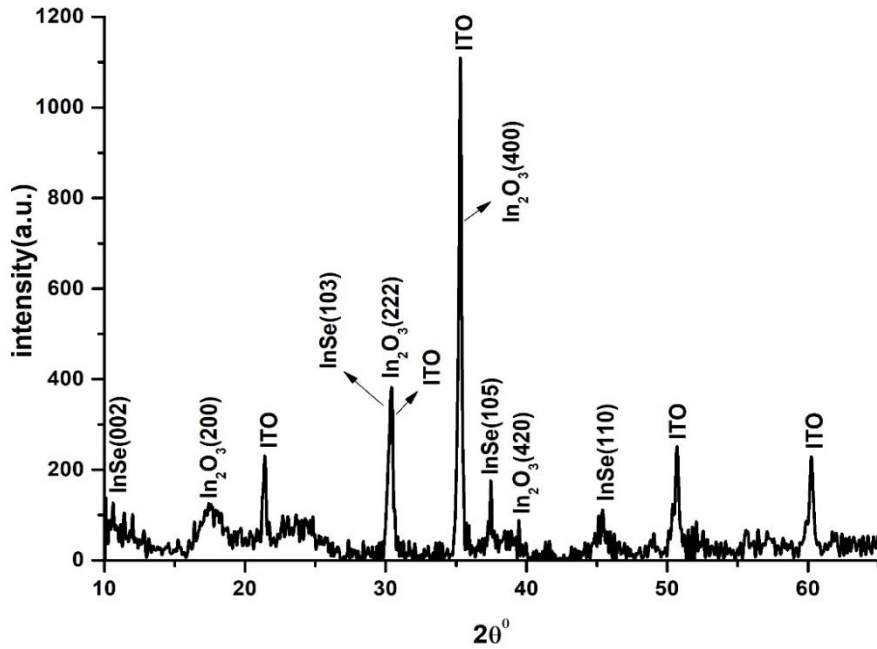
Cam/ITO/InSe ince filminin kalınlığı 1501 nm, cam/ITO/InSe(tav) ince filminin kalınlığı 452 nm, cam/ITO/CIS ince filminin kalınlığı 922 nm, cam/ITO/CIS(tav) ince filminin kalınlığı 880 nm, cam/ITO/CIGS ince filminin kalınlığı 836 nm, cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin kalınlığı 607 nm, rubrene ince filminin kalınlığı 650 nm, coronene ince filminin kalınlığı ise 302 nm olarak belirlendi.

4.2 Yapısal Özellikler

4.2.1 XRD analizi

4.2.1.1 Cam/ITO/InSe ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen InSe ince filminin XRD spektrumu şekil 4.2’de verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin InSe ve In₂O₃ fazlarını içerdiği görülmektedir. Çizelge 4.1’de bu fazların 2 θ° ve hkl değerleri verilmiştir. InSe fazının (00-034-1431) a=4.005000 Å, c=16.639999 Å, Z=4 örgü parametrelerine sahip P63/mMc InSe hegzagonal yapısında olduğu, In₂O₃ fazının (00-065-3170) a=10.140000 Å, Z=16 örgü parametrelerine sahip Ia-3 kübik yapısında olduğu belirlendi.



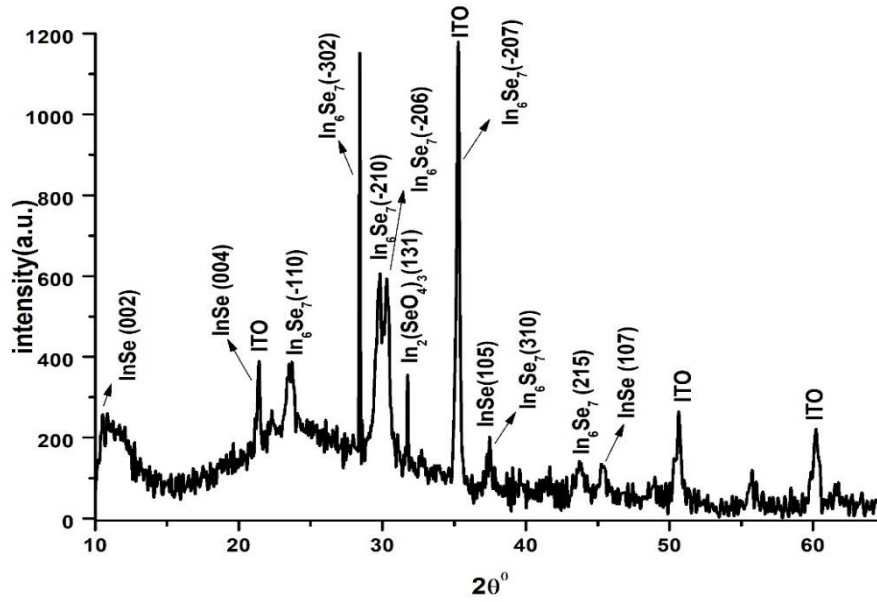
Şekil 4. 2: Cam/ITO/InSe ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 1: InSe ve In₂O₃ fazlarının 2 θ° ve hkl değerleri.

	2 θ°	hkl		2 θ°	hkl
InSe Entry 00-034-1431	10,625	002	In₂O₃ Entry 00-065-3170	17,478	200
	30,378	103		30,515	222
	37,442	105		35,380	400
	45,306	110		39,711	420

4.2.1.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan InSe ince filminin XRD spektrumu şekil 4.3'te verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin InSe, In_6Se_7 ve $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ fazlarını içerdiği görülmektedir. Çizelge 4.2'de bu fazların $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir. InSe fazının (00-034-1431) $a=4.005000 \text{ \AA}$, $c=16.639990 \text{ \AA}$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P63/mMc hegzagonal yapısında olduğu, In_6Se_7 fazının (00-025-0385) $a=9.430000 \text{ \AA}$, $b=4.063000 \text{ \AA}$, $c=18,378000 \text{ \AA}$, $\beta=109.339996^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P21 monoklinik yapısında olduğu, $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ fazının (00-027-1162) $a=8.730000 \text{ \AA}$, $b=9.210000 \text{ \AA}$, $c=12.260000 \text{ \AA}$, $\beta=91.629997^\circ$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P21/n monoklinik yapısında olduğu belirlendi.



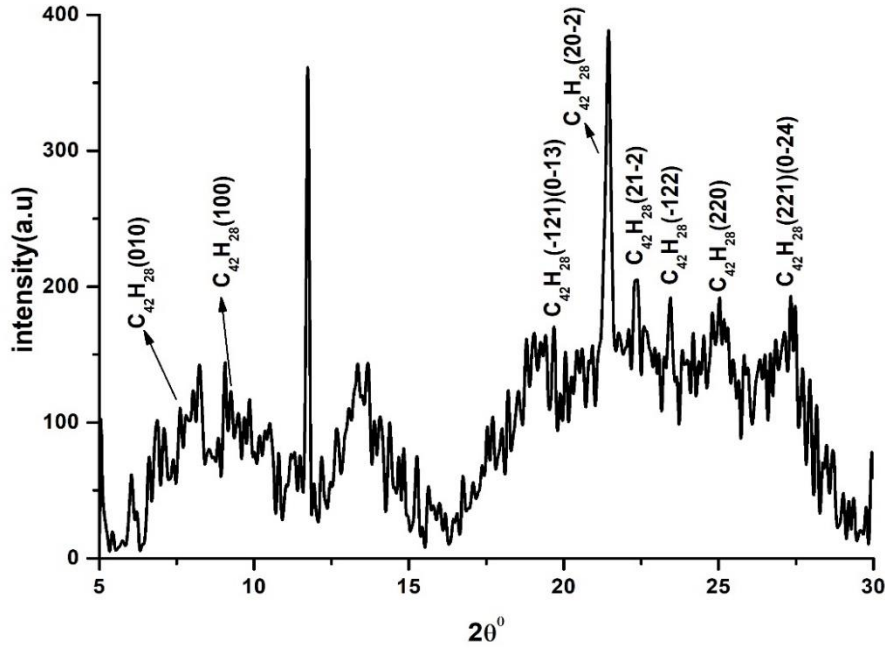
Şekil 4. 3: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 2: InSe, In_6Se_7 ve $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ fazlarının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl		$2\theta^\circ$	hkl		$2\theta^\circ$	hkl
InSe Entry 00-034- 1431	10,625	002	In ₆ Se ₇ Entry 00-025- 0385	24,032	-110	In ₂ (SeO ₄) ₃ Entry 00-027-1162	31,762	131
	21,290	004		28,401	-302			
	37,442	105		29,757	-210			
	46,036	107		30,808	-206			
				35,136	-207			
				37,523	310			
				44,074	215			

4.2.1.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.4'te verilmiştir. Rubrene ($C_{42}H_{28}$) fazının (96-412-6263) $a=9.47030$ Å, $b=12.02350$ Å, $c=13.83800$ Å, $\alpha=103.629^\circ$, $\beta=96.792^\circ$, $\gamma=91.837^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P-1 triklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.3'te bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



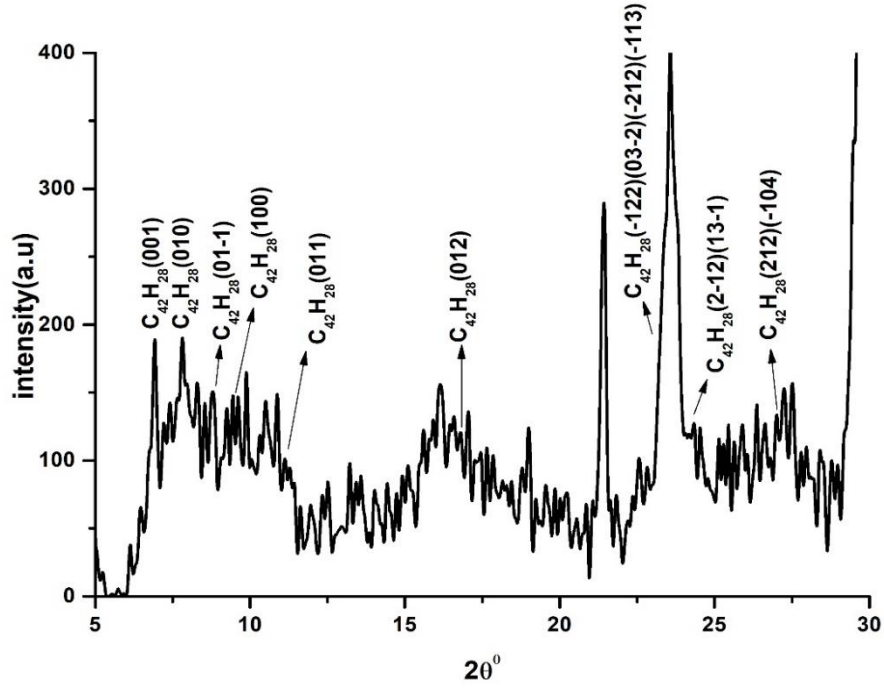
Şekil 4. 4: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 3: Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene ($C_{42}H_{28}$) Entry 96-412-6263	7,574	010	22,303	21-2
	9,415	100	23,392	-122
	19,483	-121, 0-13	25,065	220
	21,683	20-2	27,517	221

4.2.1.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.5'te verilmiştir. Rubrene ($C_{42}H_{28}$) fazının (96-412-6263) $a=9.47030$ Å, $b=12.02350$ Å, $c=13.83800$ Å, $\alpha=103.629^\circ$, $\beta=96.792^\circ$, $\gamma=91.837^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P-1 triklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.4'te bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



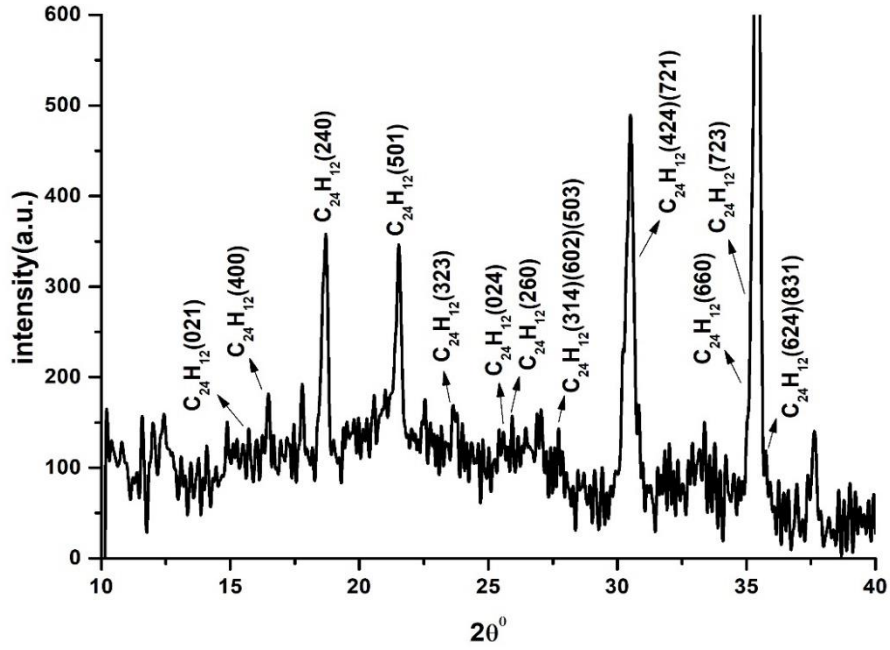
Şekil 4. 5: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 4: Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene (C ₄₂ H ₂₈) Entry 96-412-6263	6,75	001	16,79	012
	7,62	010	23,56	-122, 03-2, -212, -113
	8,74	01-1	24,33	2-12, 13-1
	9,45	100	27,00	212, -104
	11,12	011		

4.2.1.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.6'da verilmiştir. Coronene (C₂₄H₁₂) fazının (96-711-8830) $a=21.64920 \text{ \AA}$, $c=14.63120 \text{ \AA}$, $Z=16$ örgü parametrelerine sahip I41-acd tetragonal yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.5'te bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



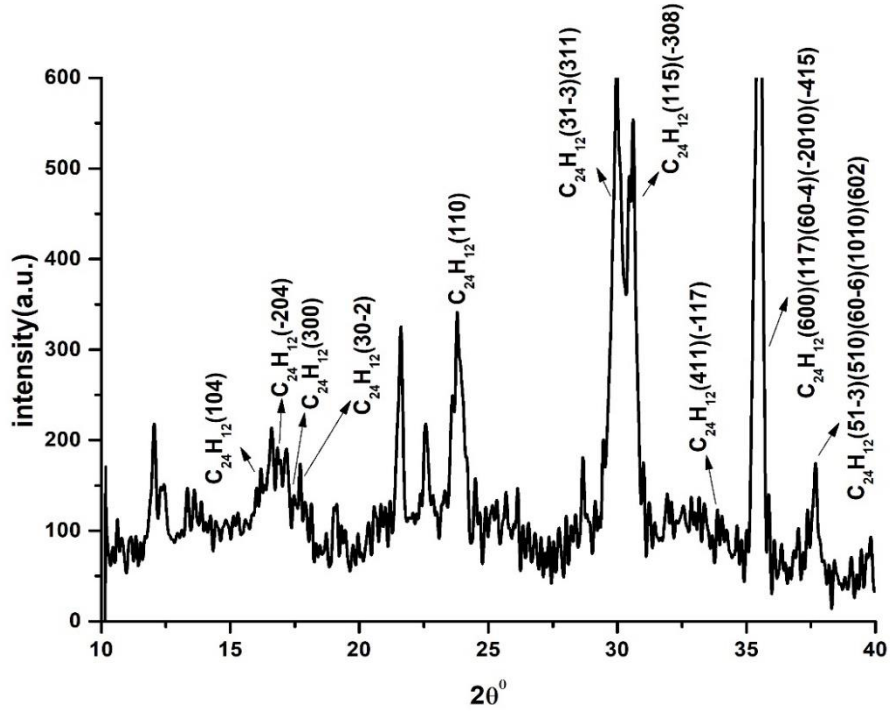
Şekil 4. 6: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 5: Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene (C ₂₄ H ₁₂) Entry 96-711-8830	15,72	321	25,92	260
	16,44	400	27,72	314, 602, 503
	18,49	240	30,51	424, 721
	21,49	501	35,18	660
	23,59	323	35,27	723
	25,58	024	35,75	624, 831

4.2.1.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.7’de verilmiştir. Coronene (C₂₄H₁₂) fazının (96-150-7458) a=15.46 Å, b=3.83180 Å, c=25.45400 Å, $\beta=101.002^\circ$, Z=4 örgü parametrelerine sahip P1 21/c1 monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.6’da bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



Şekil 4. 7: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.

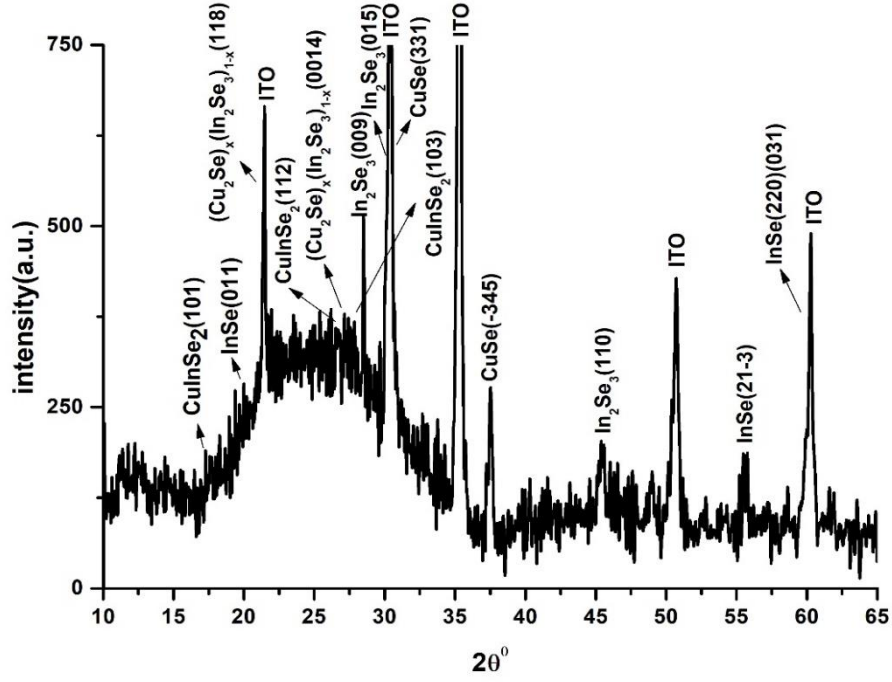
Çizelge 4. 6: Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene (C ₂₄ H ₁₂) Entry 96-150-7458	16,19	104	29,93	31-3, 311
	16,81	-204	30,60	115, -308
	17,45	300	33,88	411, -117
	17,71	30-2	35,51	600, 117, 60-4, -2010, -415
	23,79	110	37,69	51-3, 510, 60-6, 1010, 602

4.2.1.7 Cam/ITO/CIS ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen CIS ince filminin XRD spektrumu şekil 4.8’de verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin CuInSe₂, (Cu₂Se₃)_x(In₂Se₃)_{1-x}, In₂Se₃, CuSe ve InSe fazlarını içerdiği görülmektedir. Çizelge 4.7’de bu fazların $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir. CuInSe₂ fazının (00-089-5646) $a=5,760000 \text{ \AA}$, $c=11,591000 \text{ \AA}$, $Z=4$ parametrelerine sahip I-42d tetragonal yapısında olduğu, (Cu₂Se₃)_x(In₂Se₃)_{1-x} fazının (00-038-0957) $a=12,147000 \text{ \AA}$, $c=46,009998 \text{ \AA}$, $Z=48$ parametrelerine sahip P- hegzagonal yapısında olduğu, In₂Se₃ fazının (00-035-1056) $a=4,000000 \text{ \AA}$, $c=28,330000 \text{ \AA}$, $Z=3$ parametrelerine sahip R-3m rombohedral yapısında olduğu, CuSe fazının (00-049-1456) $a=14,477000 \text{ \AA}$, $b=17,216999 \text{ \AA}$, $c=14,360000 \text{ \AA}$, $\beta=120,750000^\circ$, $Z=78,900002$ parametrelerine sahip P-monoklinik

yapısında olduğu, InSe fazının (00-075-2433) $a=4.110000 \text{ \AA}$, $b=4.610000 \text{ \AA}$, $c=11.020000 \text{ \AA}$, $\alpha=87.199997^\circ$ parametrelerine sahip P2/m monoklinik yapısında olduğu belirlendi.



Şekil 4. 8: Cam/ITO/CIS ince filminin XRD spektrumu.

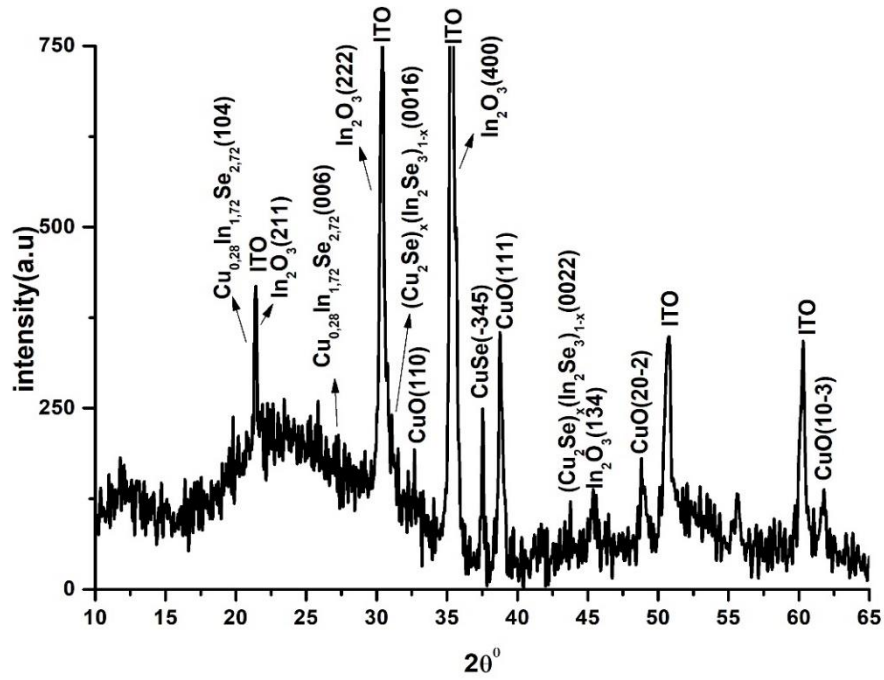
Çizelge 4. 7: CuInSe₂, (Cu₂Se)_x(In₂Se₃)_{1-x}, In₂Se₃, CuSe ve InSe fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.

		20°		hkl				20°		hkl	
CuInSe₂ Entry 00-089-5646		17,29		101		(Cu₂Se₃)_x(In₂Se₃)_{1-x} Entry 00-038-0957		21,30		118	
		26,79		112				27,00		0014	
		20°	hkl			20°	hkl			20°	hkl
In₂Se₃ Entry 00-035-1056		28,50	009	CuSe Entry 00-049-1456		30,40	331	InSe Entry 00-075-2433		20,44	011
		30,20	015			37,52	-345			55,50	21-3
		45,38	110					60,29	220, 031		

4.2.1.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan CIS ince filminin XRD spektrumu şekil 4.9'da verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin Cu_{0,28}In_{1,72}Se_{2,72}, In₂O₃, (Cu₂Se)_x(In₂Se₃)_{1-x}, CuO, CuSe fazlarını içerdiği görülmektedir. Çizelge 4.8'de bu fazların 2θ° ve hkl değerleri

verilmiştir. $\text{Cu}_{0,28}\text{In}_{1,72}\text{Se}_{2,72}$ fazının (00-039-0758) $a=9.139000 \text{ \AA}$, $c=19.658001 \text{ \AA}$, $Z=12$ parametrelerine sahip P-hegzagonal yapısında olduğu, In_2O_3 fazının (00-065-3170) $a=10.1400000 \text{ \AA}$, $Z=16$ parametrelerine sahip Ia-3 kübik yapısında olduğu, $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ fazının (00-038-0957) $a=12.147000 \text{ \AA}$, $c=46.009998 \text{ \AA}$, $Z=48$ parametrelerine sahip P- hegzagonal yapısında olduğu, CuO fazının (00-048-1548) $a=4.688300 \text{ \AA}$, $b=3.422900 \text{ \AA}$, $c=5.131900 \text{ \AA}$, $\beta=99.505997^\circ$, $Z=4$ parametrelerine sahip C2/c monoklinik yapısında olduğu, CuSe fazının (00-049-1456) $a=14.477000 \text{ \AA}$, $b=17.216999 \text{ \AA}$, $c=14.360000 \text{ \AA}$, $\beta=120.750000^\circ$, $Z=78.900002$ parametrelerine sahip P-monoklinik yapısında olduğu belirlendi.



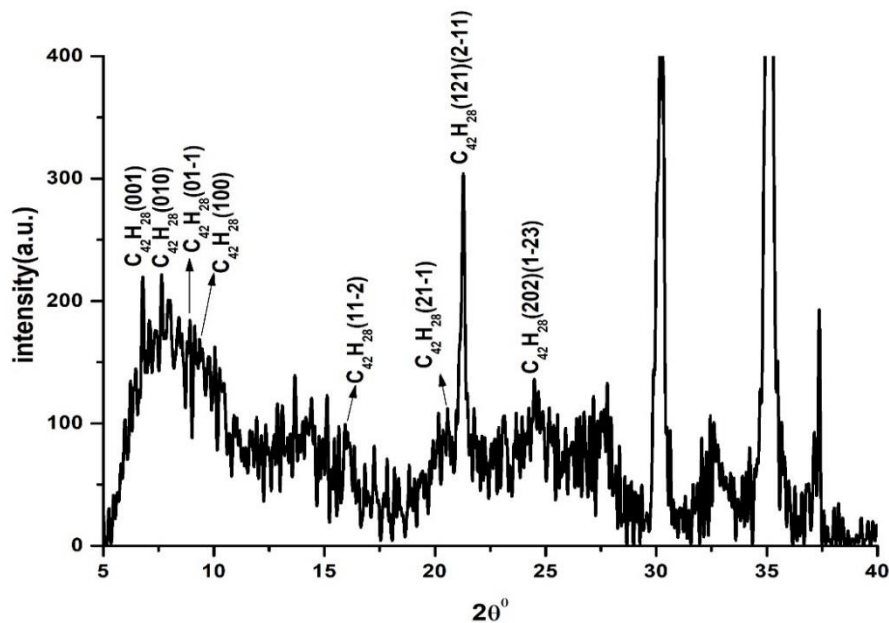
Şekil 4. 9: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 8: Cu_{0,28}In_{1,72}Se_{2,72}, In₂O₃, (Cu₂Se)_x(In₂Se₃)_{1-x}, CuO ve CuSe fazlarının 2θ° ve hkl değerleri.

		20°		hkl				20°		hkl	
Cu_{0,28}In_{1,72}Se_{2,72} Entry 00-039-0758		21,44		104		(Cu₂Se)_x(In₂Se₃)_{1-x} Entry 00-038-0957		31,08		0016	
		27,30		006				43,25		0022	
		20°	hkl		20°	hkl			20°	hkl	
In₂O₃ Entry 00-065-3170		21,44	211	CuSe Entry 00-049-1456	37,52	-345	CuO Entry 00-048-1548		32,70	110	
		30,42	222						38,80	111	
		35,34	400						48,80	20-2	
		45,60	134						61,71	10-3	

4.2.1.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.10’da verilmiştir. Rubrene ($C_{42}H_{28}$) fazının (96-412-6263) $a=9.47030$ Å, $b=12.02350$ Å, $c=13,83800$ Å, $\alpha=103.629^\circ$, $\beta=96,792^\circ$, $\gamma=91.837^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P-1 triklirik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.9’da bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



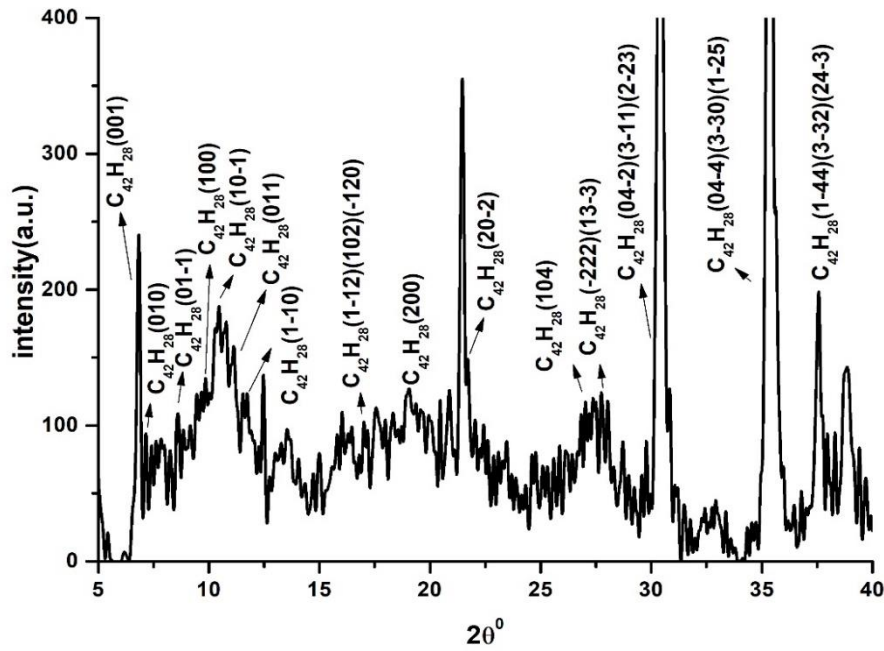
Sekil 4. 10: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 9: Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene	6,63	001	16,05	11-2
(C ₄₂ H ₂₈)	7,66	010	20,56	21-1
Entry	8,79	01-1	21,27	121, 2-11
96-412-6263	9,46	100	24,49	202, 1-23

4.2.1.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.11’de verilmiştir. Rubrene (C₄₂H₂₈) fazının (96-412-6263) $a=9.47030$ Å, $b=12.02350$ Å, $c=13.83800$ Å, $\alpha=103.629^\circ$, $\beta=96.792^\circ$, $\gamma=91.837^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P-1 triklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.10’da bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



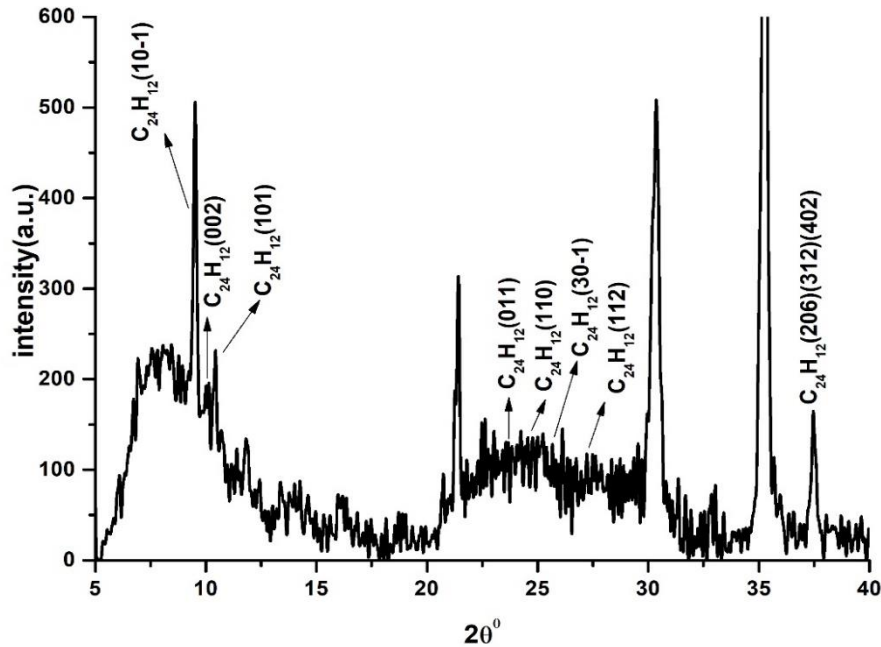
Şekil 4. 11: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 10: Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene (C₄₂H₂₈) Entry 96-412-6263	6,85	001	18,89	200
	7,57	010	21,70	20-2
	8,65	01-1	27,19	104
	9,45	100	27,70	-222, 13-3
	10,78	10-1	30,27	04-2, 3-11, 2-23
	11,13	011	35,65	04-4, 3-30, 1-25
	11,73	1-10	37,56	1-44, 3-32, 24-3
	17,17	1-12, 102, -120		

4.2.1.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.12’de verilmiştir. Coronene (C₂₄H₁₂) fazının (96-154-8040) a=10.38550 Å, b=3.82120 Å, c=17.21110 Å, $\beta=96.235^\circ$, Z=2 örgü parametrelerine sahip P1 21/n1 monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.11’de bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



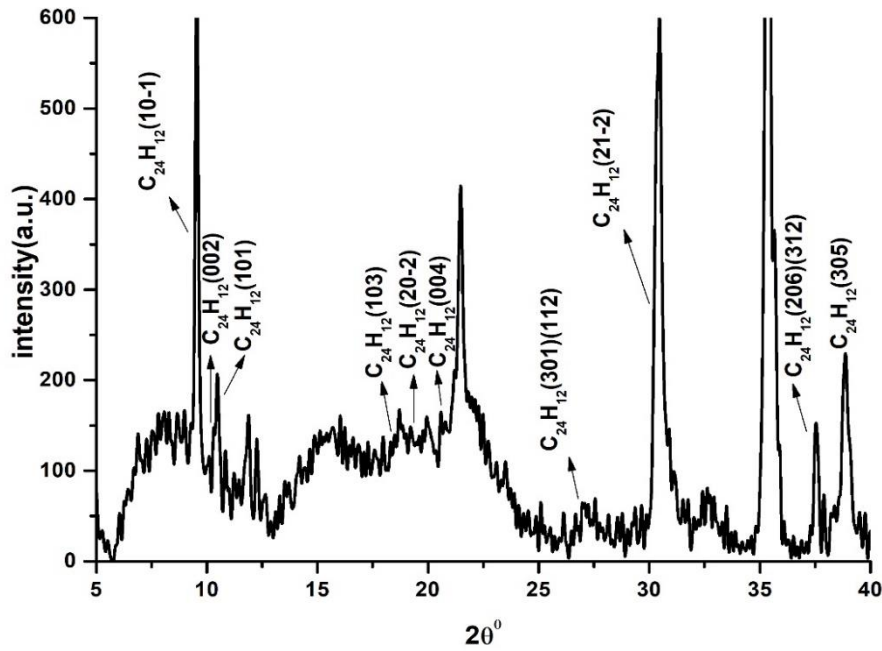
Şekil 4. 12: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 11: Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene (C₂₄H₁₂) Entry 96-154-8040	9,51	10-1	24,77	110
	10,30	002	25,53	30-1
	10,43	101	27,22	112
	23,83	011	37,46	206, 312, 402

4.2.1.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.13'te verilmiştir. Coronene (C₂₄H₁₂) fazının (96-154-8040) $a=10.38550 \text{ \AA}$, $b=3.82120 \text{ \AA}$, $c=17.21110 \text{ \AA}$, $\beta=96.235^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P1 21/n1 monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.12'de bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



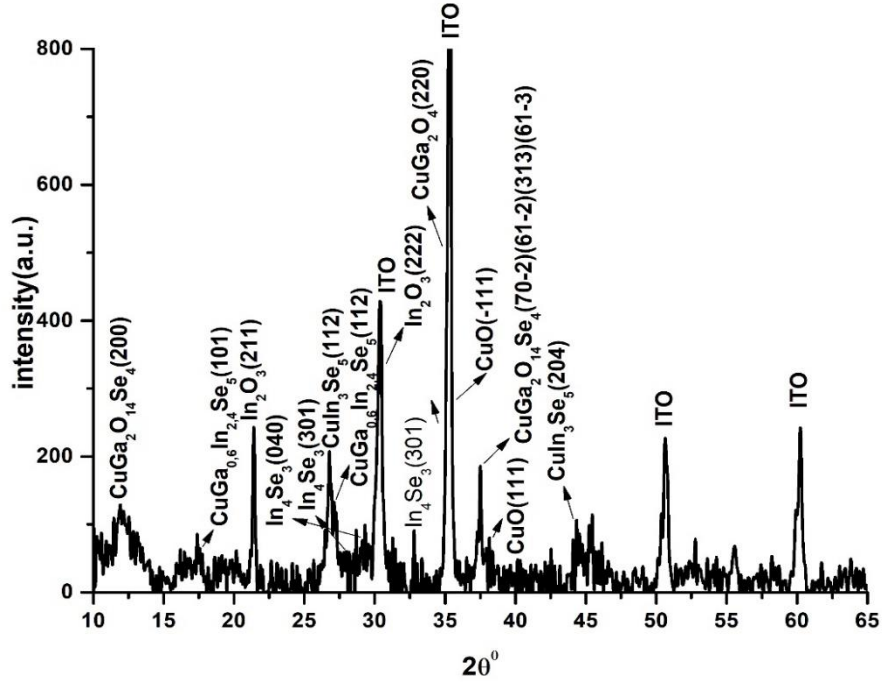
Şekil 4. 13: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 12: Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene (C₂₄H₁₂) Entry 96-154-8040	9,51	10-1	20,58	004
	10,31	002	27,27	301, 112
	10,48	101	30,28	21-2
	18,49	103	37,47	206, 312
	19,18	20-2	39,09	305

4.2.1.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen CIGS ince filminin XRD spektrumu şekil 4.13'te verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin $\text{CuGa}_2\text{O}_{14}\text{Se}_4$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, In_2O_3 , CuIn_3Se_5 , In_4Se_3 , CuGa_2O_4 , CuO fazlarını içerdiği görülmektedir. $\text{CuGa}_2\text{O}_{14}\text{Se}_4$ fazının (96-430-2741) $a=16.97570 \text{ \AA}$, $b=4.58810 \text{ \AA}$, $c=14.90230 \text{ \AA}$, $\beta=115.493^\circ$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P1 21/c1 monoklinik yapısında olduğu, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$ fazının (00-051-1222) $a=5,686300 \text{ \AA}$, $c=11,429000 \text{ \AA}$, $Z=1,700000$ örgü parametrelerine sahip P-42c (112) tetragonal yapısında olduğu, In_2O_3 fazının (00-088-2160) $a=10.117000 \text{ \AA}$, $Z=16$ örgü parametrelerine sahip Ia-3 kübik yapısında olduğu, CuIn_3Se_5 fazının (00-051-1221) $a=5.754100 \text{ \AA}$, $c=11.538000 \text{ \AA}$, $Z=1.700000$ örgü parametrelerine sahip P-42c tetragonal yapısında olduğu, In_4Se_3 fazının (00-048-1575) $a=15.424000 \text{ \AA}$, $b=12.278000 \text{ \AA}$, $c=4.089000 \text{ \AA}$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P n nm ortorombik yapısında olduğu, CuGa_2O_4 fazının (00-044-0183) $a=8.300500 \text{ \AA}$, $Z=8$ örgü parametrelerine sahip Fd3m kübik yapısında olduğu, CuO fazının (00-089-2531) $a=4.669100 \text{ \AA}$, $b=3.480500 \text{ \AA}$, $c=5.118300 \text{ \AA}$, $\beta=98,598000^\circ$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip C2/c monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.13'te bu fazların $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



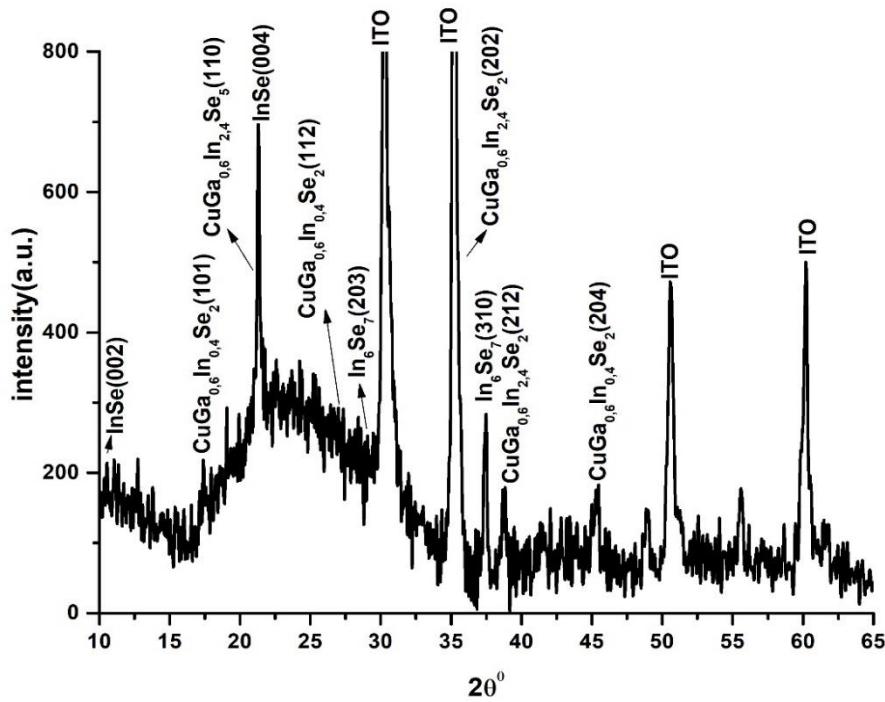
Şekil 4. 14: Cam/ITO/CIGS ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 13: $\text{CuGa}_2\text{O}_{14}\text{Se}_4$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, In_2O_3 , CuIn_3Se_5 , In_4Se_3 , CuGa_2O_4 , CuO fazlarının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	2θ°	hkl		2θ°	hkl		2θ°	hkl
CuO Entry (00-089-2531)	35,34	-111	CuGa_{0,6}In_{2,4}Se₅ Entry 00-051-1222	17,58	101	In₂O₃ Entry 00-088-2160	21,47	211
	38,31	111		27,11	112		30,47	222
CuIn₃Se₅ Entry 00-051-1221	112	26,78	In₄Se₃ Entry 00-048-1575	27,97	301	CuGa₂O₄ Entry (00-044-0183)	30,47	220
	204	44,55		29,13	040			
CuGa₂O₁₄Se₄ Entry 96-430-2741	11,67	200						
	37,49	70-2, 612, 313, 61-3						

4.2.1.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin XRD analizi

Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan CIGS ince filminin XRD spektrumu şekil 4.15'te verilmiştir. Filmi oluşturan bileşiklerin $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, InSe , In_6Se_7 fazlarını içerdiği görülmektedir. Çizelge 4.14'te bu fazların $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir. $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$ fazının (00-035-1101) $a=5,680000 \text{ \AA}$, $c=11,264000 \text{ \AA}$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip I-42d tetragonal yapısında olduğu, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$ fazının (00-051-1222) $a=5,686300 \text{ \AA}$, $c=11,229000 \text{ \AA}$, $Z=1,700000$ örgü parametrelerine sahip P-42c tetragonal yapısında olduğu, InSe fazının (00-034-1431) $a=4,005000 \text{ \AA}$, $c=16,639999 \text{ \AA}$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P63/mMc InSe hegzagonal yapısında olduğu, In_6Se_7 fazının (00-025-0385) $a=9,430000 \text{ \AA}$, $b=4,063000$, $c=18,378000 \text{ \AA}$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P21 monoklinik yapısında olduğu belirlendi.



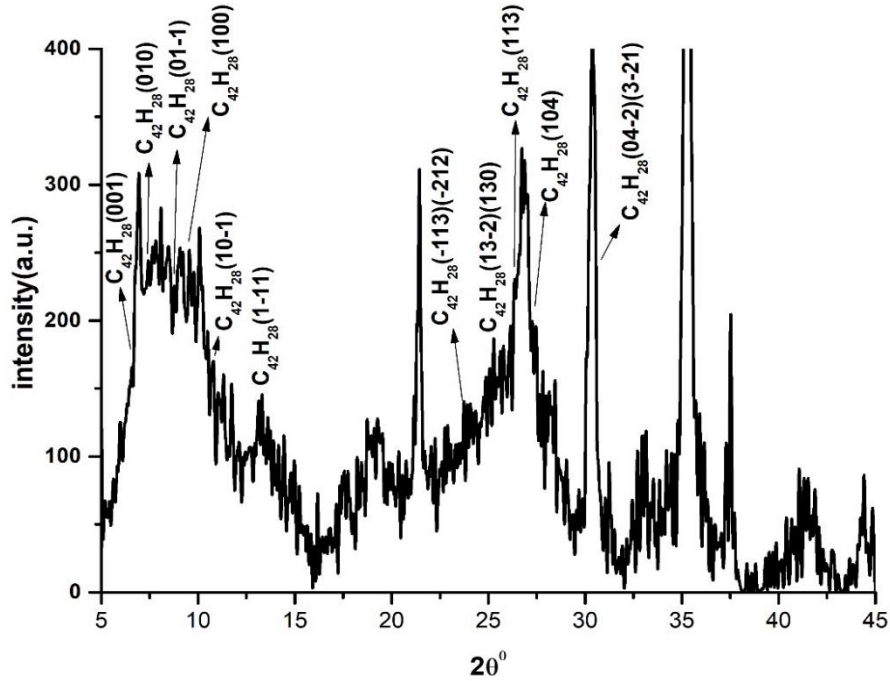
Şekil 4. 15: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 14: $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, InSe , In_6Se_7 fazlarının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl		$2\theta^\circ$	hkl
$\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$	17,37	101	$\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$	22,17	110
Entry	27,17	112	Entry	35,26	202
(00-035-1101)	45,46	204	(00-051-1222)	38,67	212
InSe	10,54	002	In_6Se_7	29,07	203
Entry	21,28	004	Entry	37,47	310
(00-034-1431)			(00-025-0385)		

4.2.1.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.16’da verilmiştir. Rubrene ($\text{C}_{42}\text{H}_{28}$) fazının (96-412-6263) $a=9.47030 \text{ \AA}$, $b=12.02350 \text{ \AA}$, $c=13.83800 \text{ \AA}$, $\alpha=103.629^\circ$, $\beta=96.792^\circ$, $\gamma=91.837^\circ$, $Z=2$ örgü parametrelerine sahip P-1 triklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.15’te bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



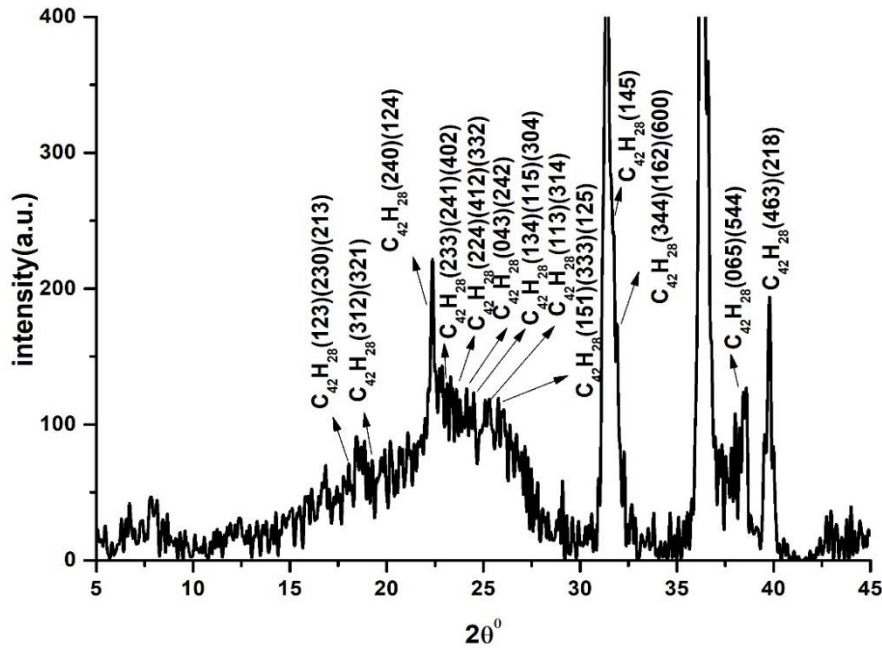
Şekil 4. 16: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 15: Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene (C₄₂H₂₈) Entry (96-412-6263)	6,61	001	23,73	-113, -212
	7,55	010	25,46	13-2, 130
	8,74	01-1	26,03	113
	9,45	100	27,27	104
	10,78	10-1	30,36	04-2, 3-21
	13,14	1-11		

4.2.1.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.17’de verilmiştir. Rubrene (C₄₂H₂₈) fazının (96-150-3738) a=16.753000 Å, b=17.878000 Å, c=18.941000 Å, Z=8 örgü parametrelerine sahip Pbca ortorombik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.16’da bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



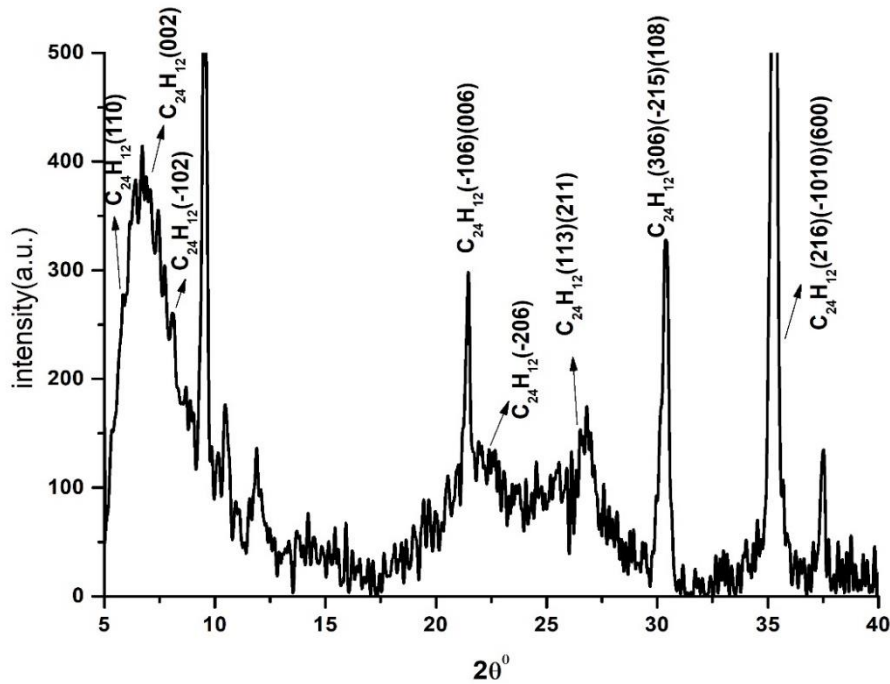
Şekil 4. 17: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 16: Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen rubrene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Rubrene ($C_{42}H_{28}$) Entry (96-150-3738)	18,05	123, 230, 213	25,09	133, 314
	19,05	312, 321	25,96	151, 333, 125
	22,30	240,124	31,40	145
	23,13	233, 241, 402	31,89	344, 162, 600
	23,80	224, 412, 332	38,51	065, 544
	24,32	043, 242	39,80	463, 218
	24,50	134, 115, 304		

4.2.1.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.18’de verilmiştir. Coronene ($C_{24}H_{12}$) fazının (96-150-7458) $a=15.468 \text{ \AA}$, $b=3.83180 \text{ \AA}$, $c=25.45400 \text{ \AA}$, $\beta=101.002^\circ$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P1 21/c1 monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.17’de bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



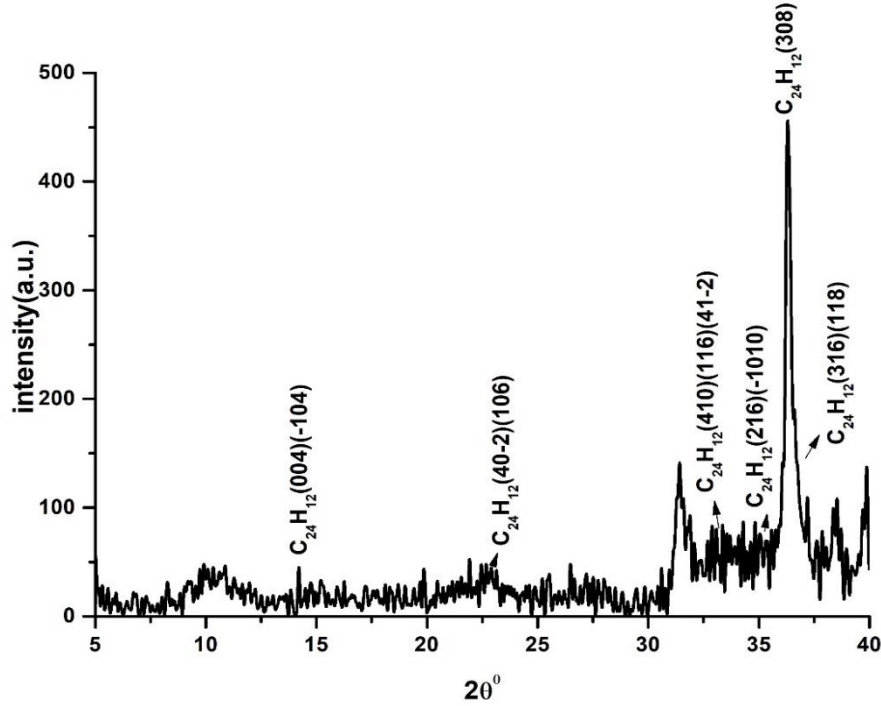
Şekil 4. 18: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 17: Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

	$2\theta^\circ$	hkl	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene ($C_{24}H_{12}$) Entry (96-150-7458)	5,85	110	22,39	-206
	7,08	002	26,64	113, 211
	8,15	-102	30,31	306, -215, 108
	21,16	-106, 006	35,30	-1010, 600

4.2.1.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin XRD analizi

Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin XRD spektrumu şekil 4.19’da verilmiştir. Coronene ($C_{24}H_{12}$) fazının (96-150-7458) $a=15.468 \text{ \AA}$, $b=3.83180 \text{ \AA}$, $c=25.45400 \text{ \AA}$, $\beta=101.002^\circ$, $Z=4$ örgü parametrelerine sahip P1 21/c1 monoklinik yapısında olduğu belirlendi. Çizelge 4.18’de bu fazın $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri verilmiştir.



Şekil 4. 19: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin XRD spektrumu.

Çizelge 4. 18: Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen coronene fazının $2\theta^\circ$ ve hkl değerleri.

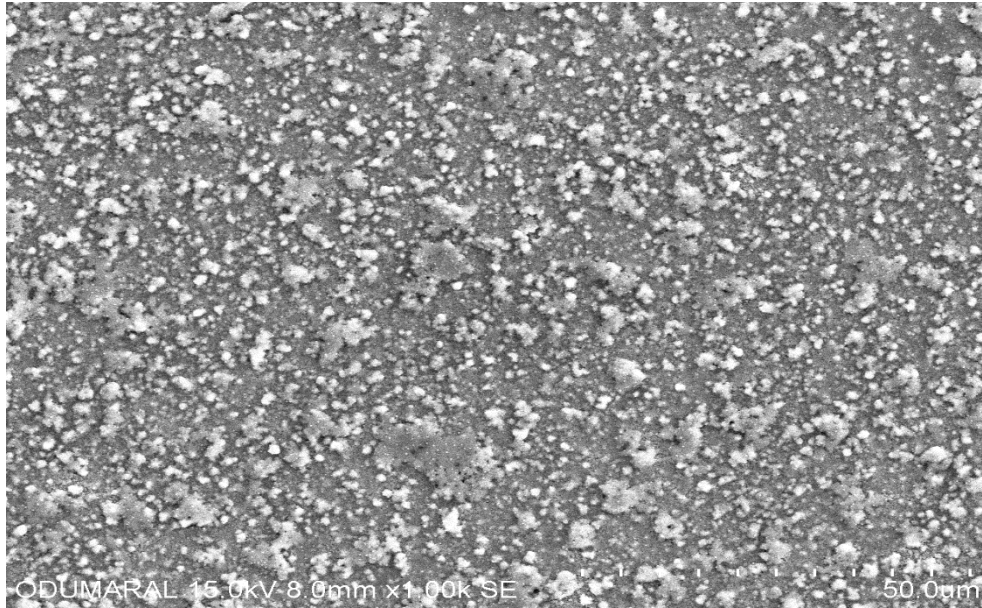
	$2\theta^\circ$	hkl
Coronene (C₂₄H₁₂) Entry (96-150-7458)	14,21	004, -104
	23,13	40-2, 106
	33,08	410, 116, 41-2
	35,27	216, -1010
	36,61	308
	38,53	316, 118

4.2.2 SEM analizi

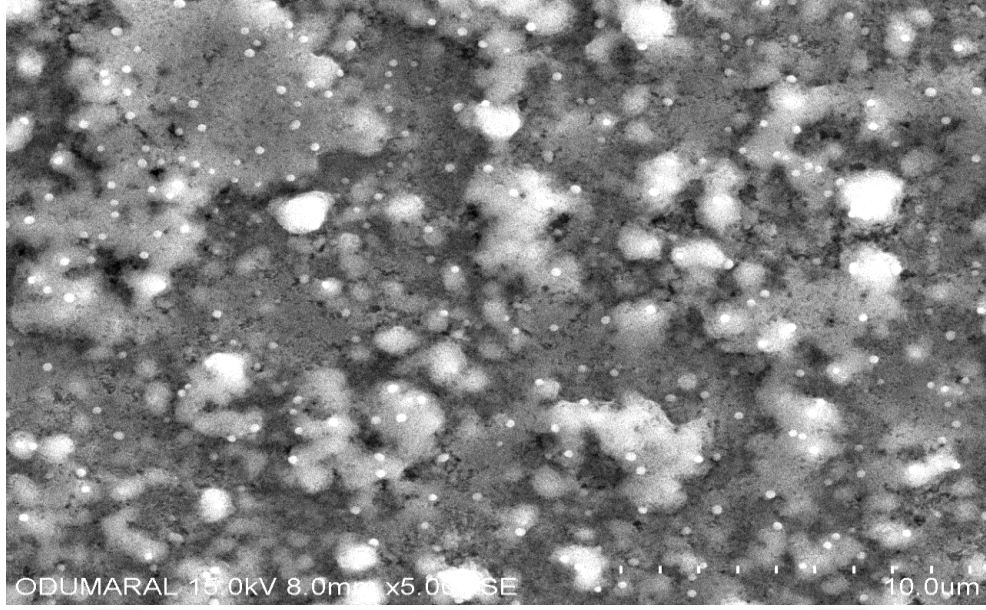
SEM analizi yüzey pürüzlülüğü hesaplamalarında Gwyddion programı kullanıldı. Pürüzlülük hesabının AFM analizi ile paralel olması için 25x25 μm yüzey alanı seçildi. Pürüzlülük hesabı tüm ince filmler için 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri ile yapıldı.

4.2.2.1 Cam/ITO/InSe ince filminin SEM analizi

Şekil 4.20-21’de cam/ITO/InSe ince filminin 1000 ve 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 316 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü, dağılımın düzensiz ve bazı bölgelerde topaklanmaların olduğu görüldü.



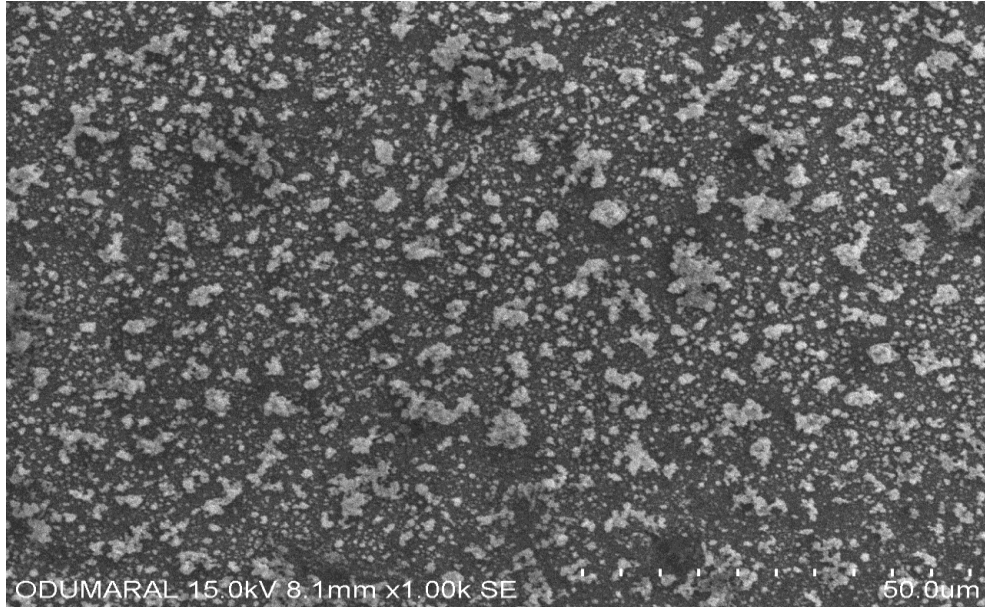
Şekil 4. 20: Cam/ITO/InSe ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



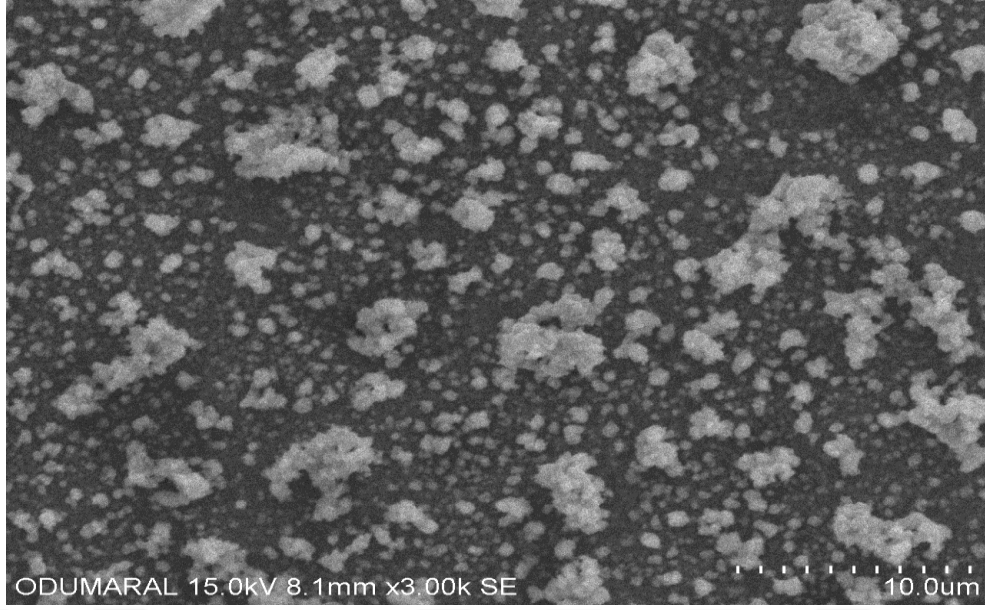
Şekil 4. 21: Cam/ITO/InSe ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin SEM analizi

Şekil 4.22-23'te cam/ITO/InSe(tav) ince filminin 1000 ve 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 332 nm olarak belirlendi. Tavlama ile ince film pürüzlülüğünün arttığı, küçük parçacıkların birleşerek daha büyük yapılar meydana getirdiği, ince film yüzeyinin pürüzlü ve dağılımın düzensiz olduğu görüldü.



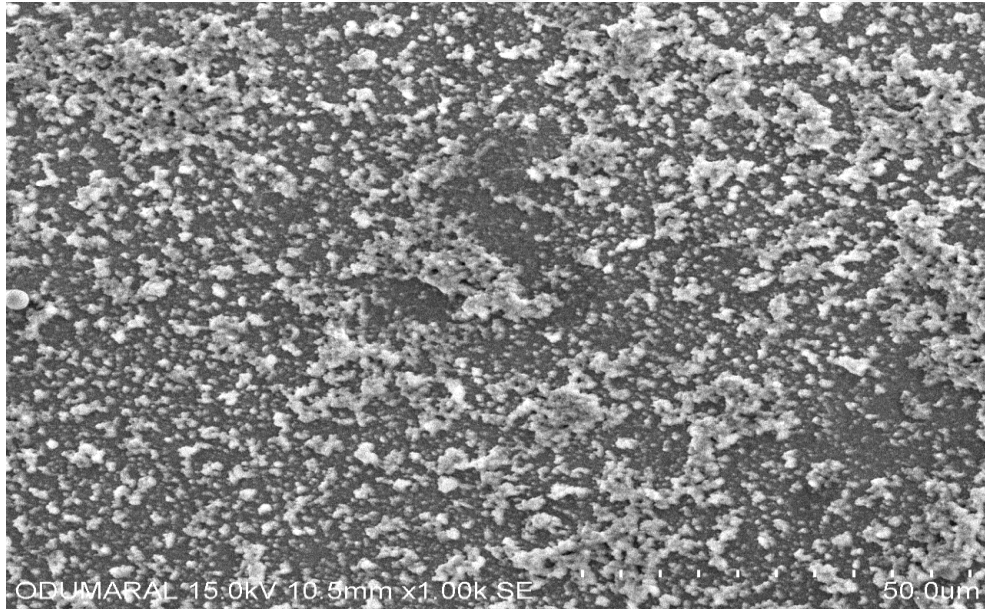
Şekil 4. 22: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



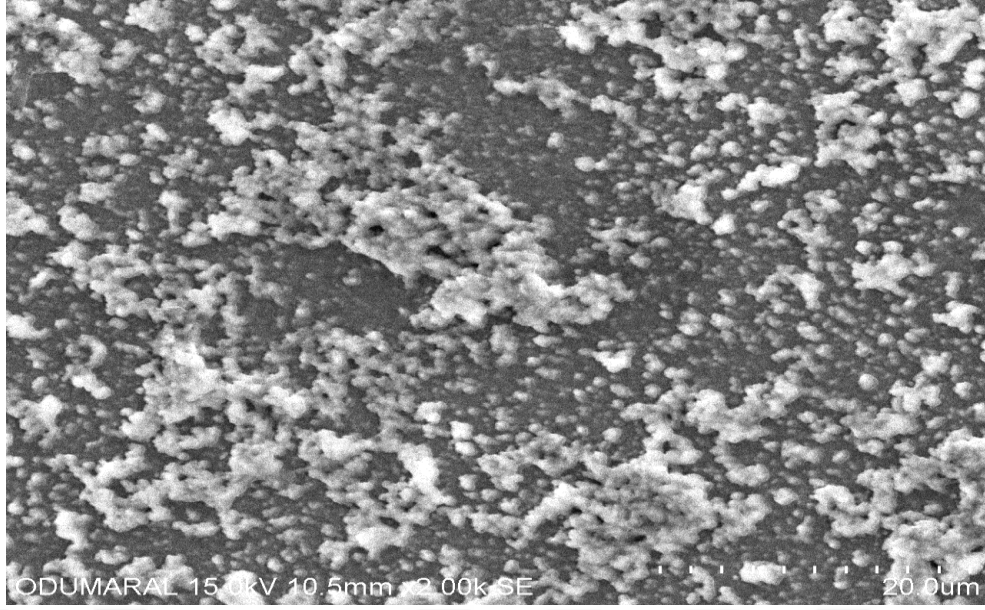
Şekil 4. 23: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.24-25'te cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 451 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü ve dağılımın düzensiz olduğu görüldü.



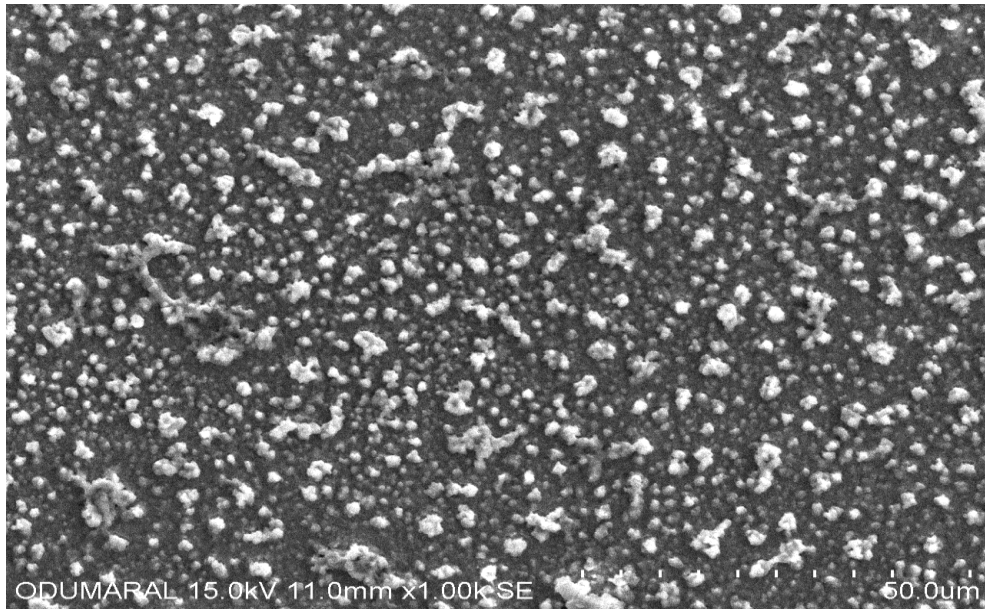
Şekil 4. 24: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



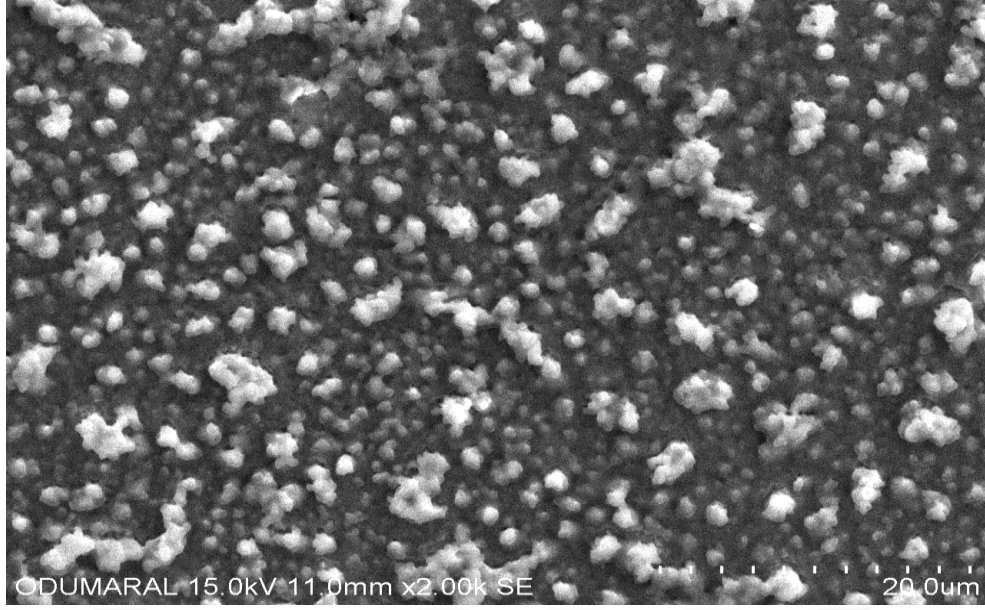
Şekil 4. 25: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.26-27’de cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 396 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü olduğu ve neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü.



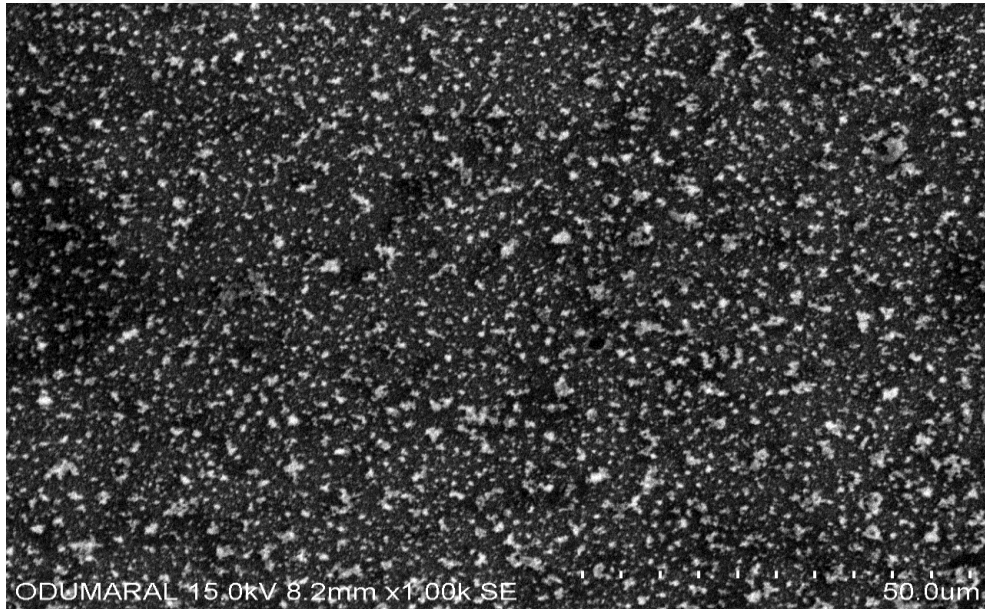
Şekil 4. 26: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



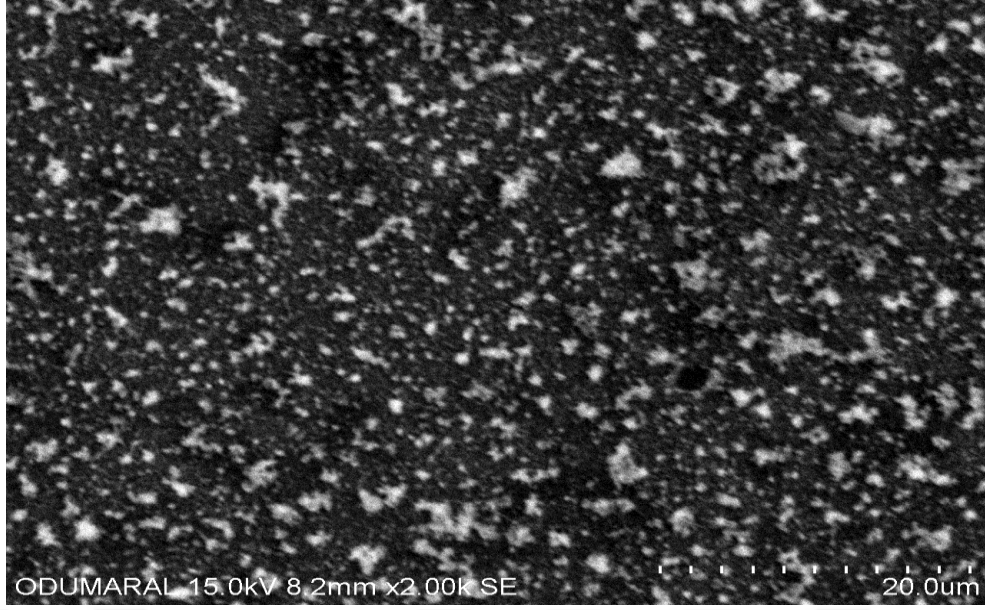
Şekil 4. 27: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.28-29’da cam/ITO/InSe/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 298 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü ve dağılımın neredeyse homojen olduğu görüldü.



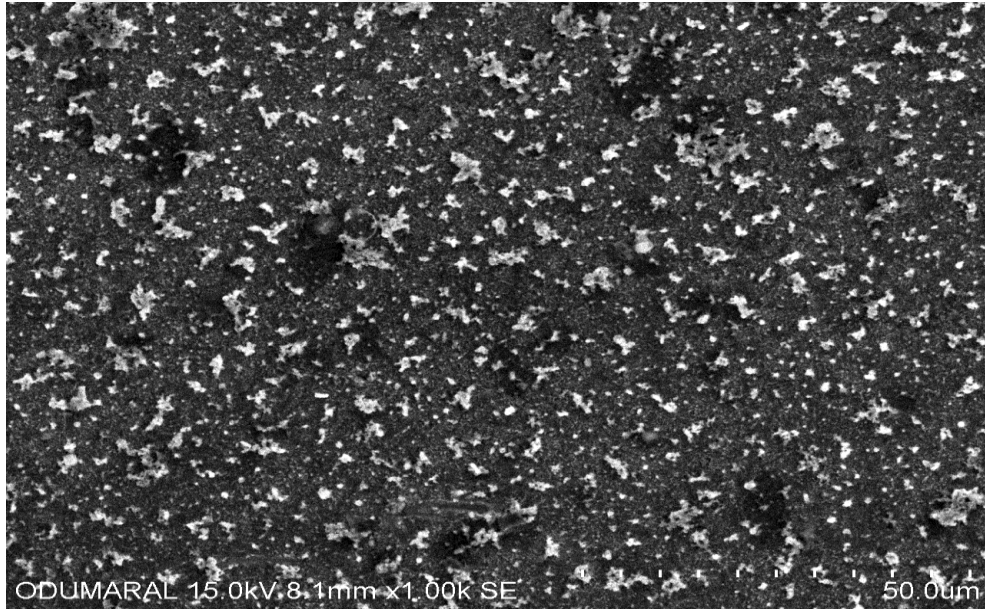
Şekil 4. 28: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



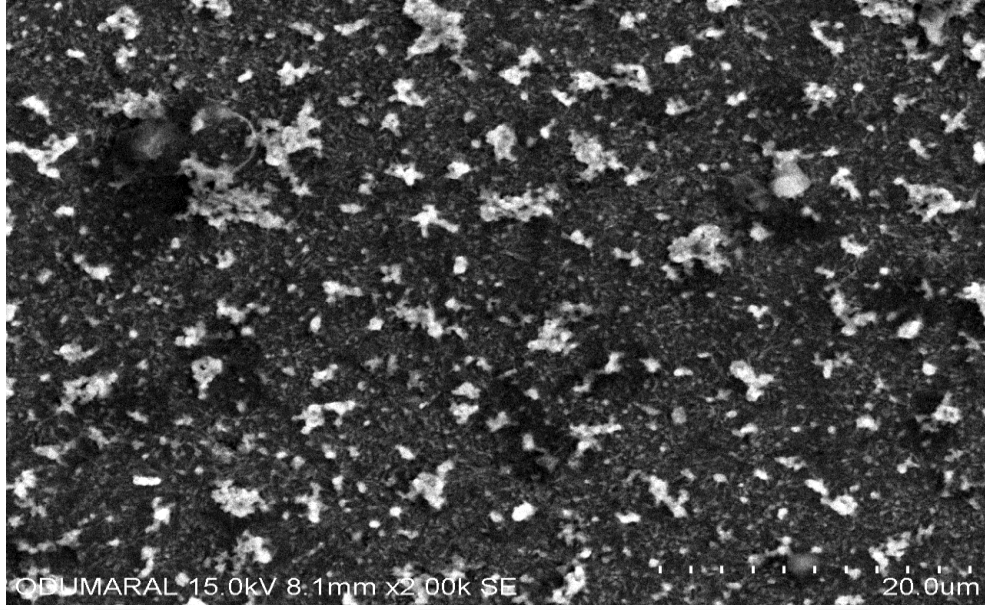
Şekil 4. 29: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.30-31’de cam/ITO/InSe(tav)/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 374 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü olduğu ve bazı bölgelerde derin çukurların var olduğu görüldü.



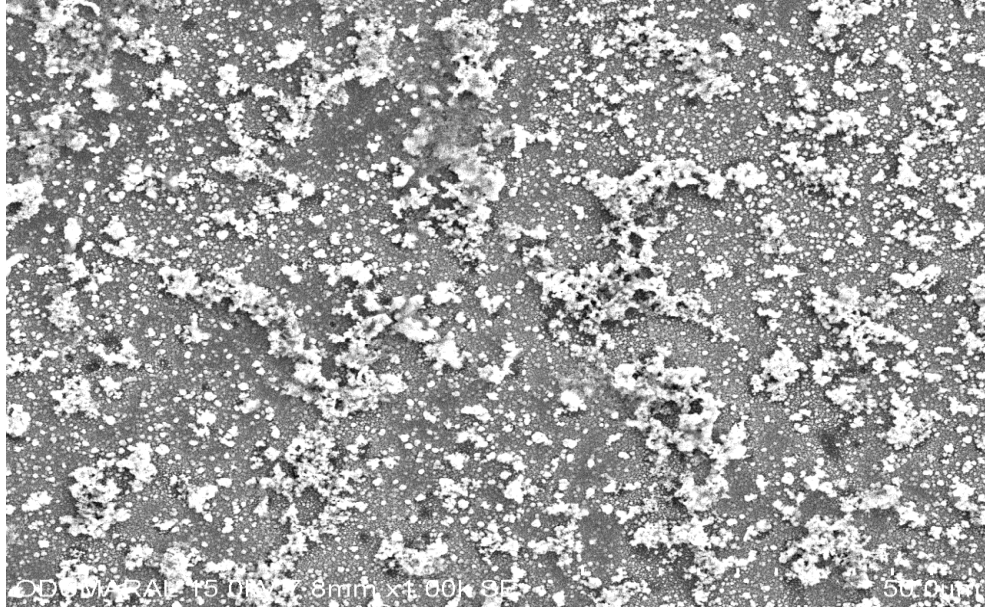
Şekil 4. 30: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



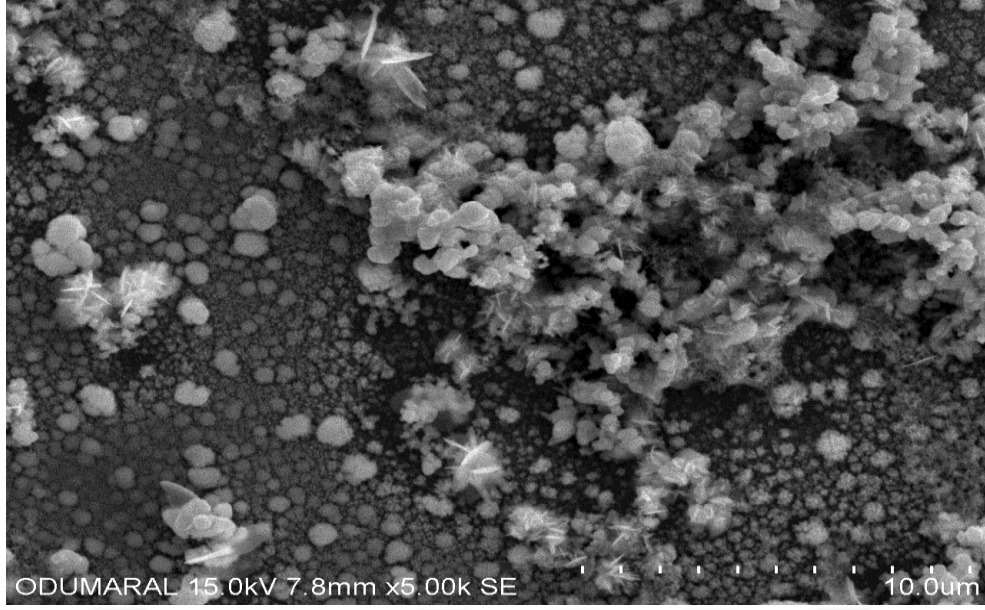
Şekil 4. 31: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.7 Cam/ITO/CIS ince filminin SEM analizi

Şekil 4.32-33'te cam/ITO/CIS filminin 1000 ve 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 542 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin pürüzlü, dağılımın düzensiz ve bazı bölgelerde topakların var olduğu görüldü.



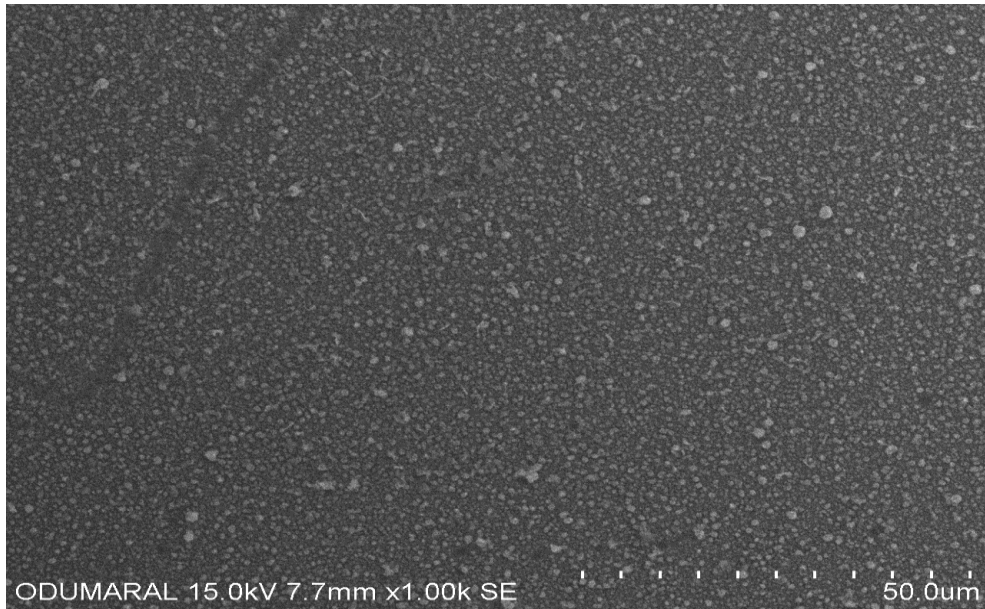
Şekil 4. 32: Cam/ITO/CIS ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



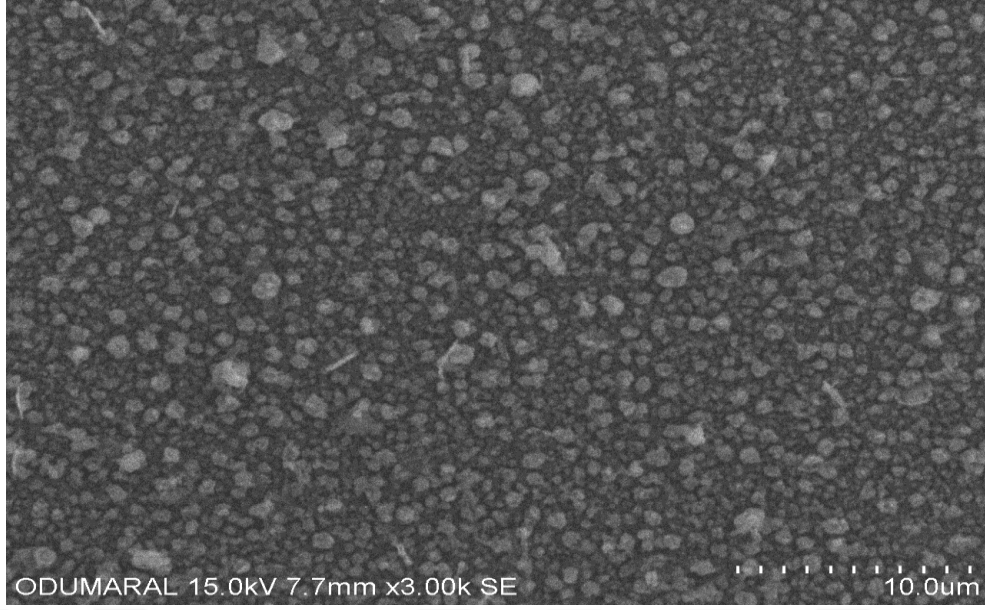
Şekil 4. 33: Cam/ITO/CIS ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin SEM analizi

Şekil 4.34-35’te cam/ITO/CIS(tav) filminin 1000 ve 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 145 nm olarak belirlendi. Tavlama ile film pürüzlülüğünün azaldığı, bazı bölgelerdeki topaklanmaların ortadan kaybolduğu ve dağılımın neredeyse homojen olduğu görüldü.



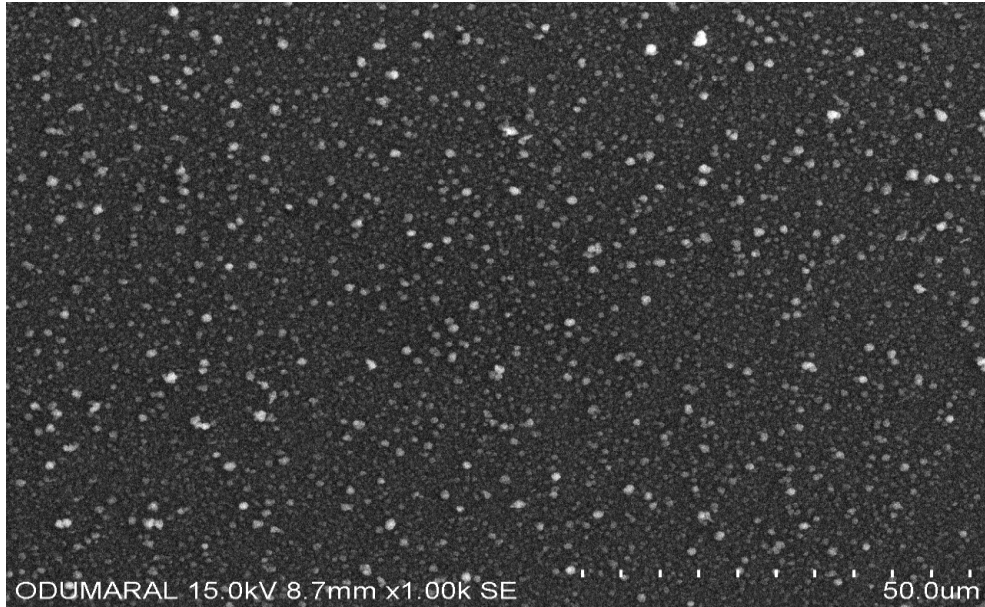
Şekil 4. 34: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



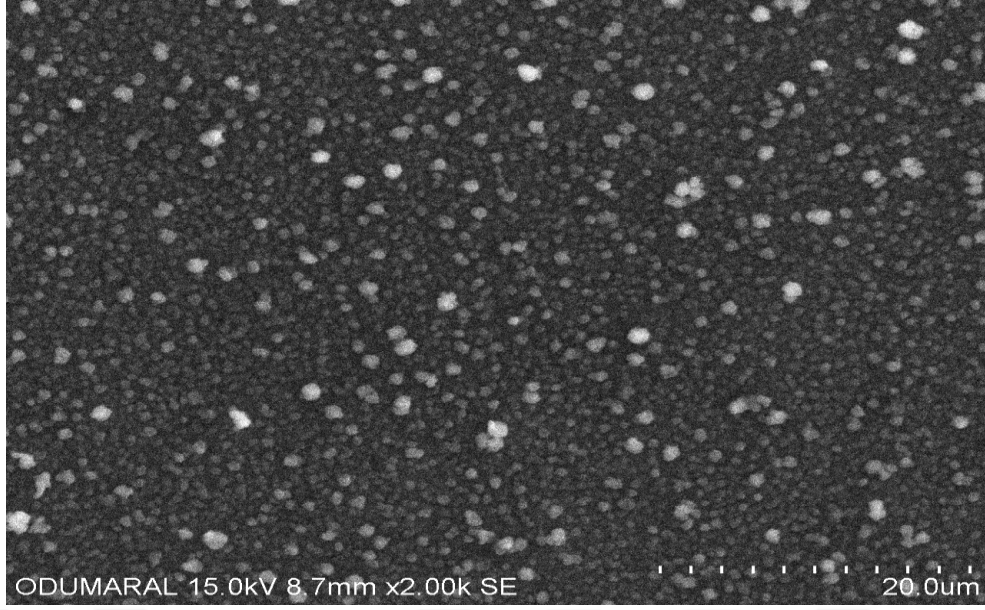
Şekil 4. 35: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.36-37’de cam/ITO/CIS/rubrene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 192 nm olarak belirlendi. Film yüzeyinin neredeyse homojen bir dağılım sergilediği görüldü.



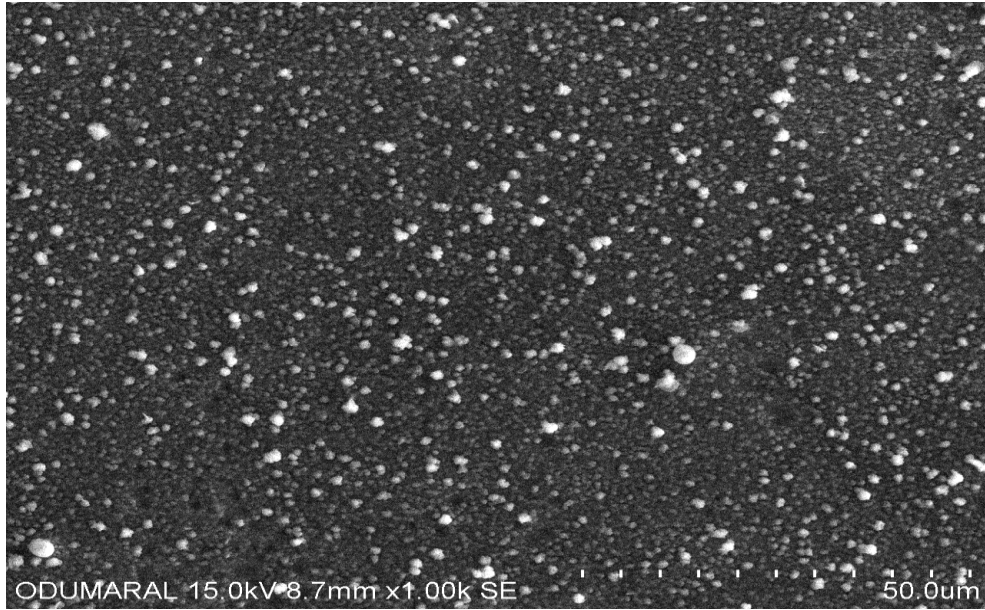
Şekil 4. 36: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



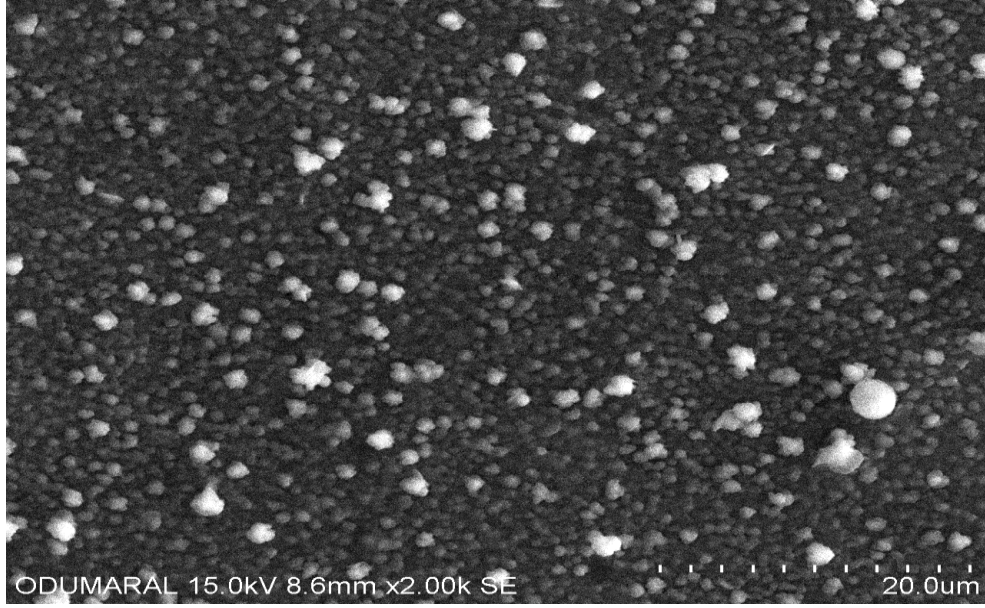
Şekil 4. 37: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.28-39’da cam/ITO/CIS(tav)/rubrene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 239 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü.



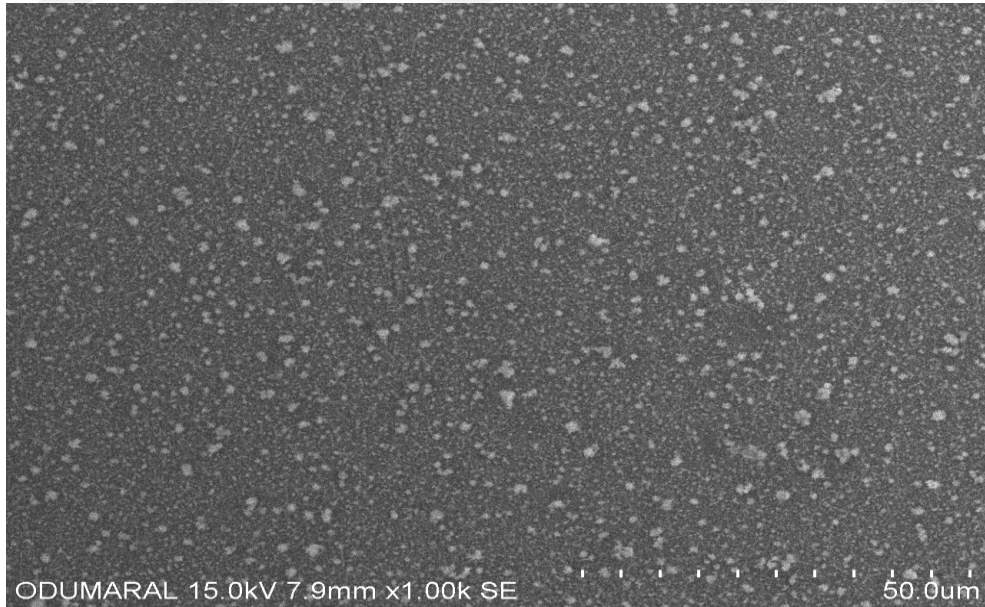
Şekil 4. 38: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



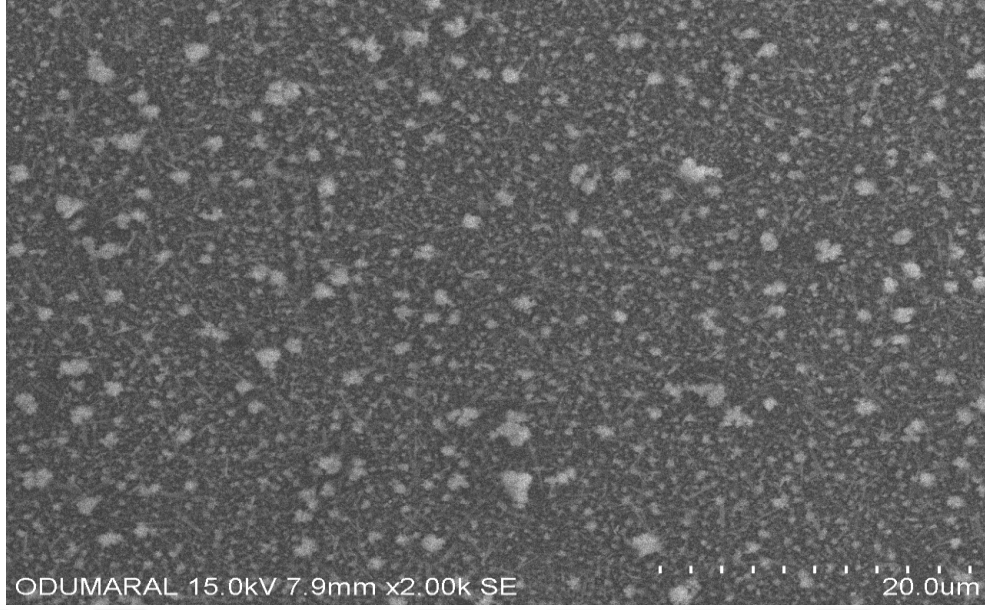
Şekil 4. 39: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.40-41’de cam/ITO/CIS/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 161 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü.



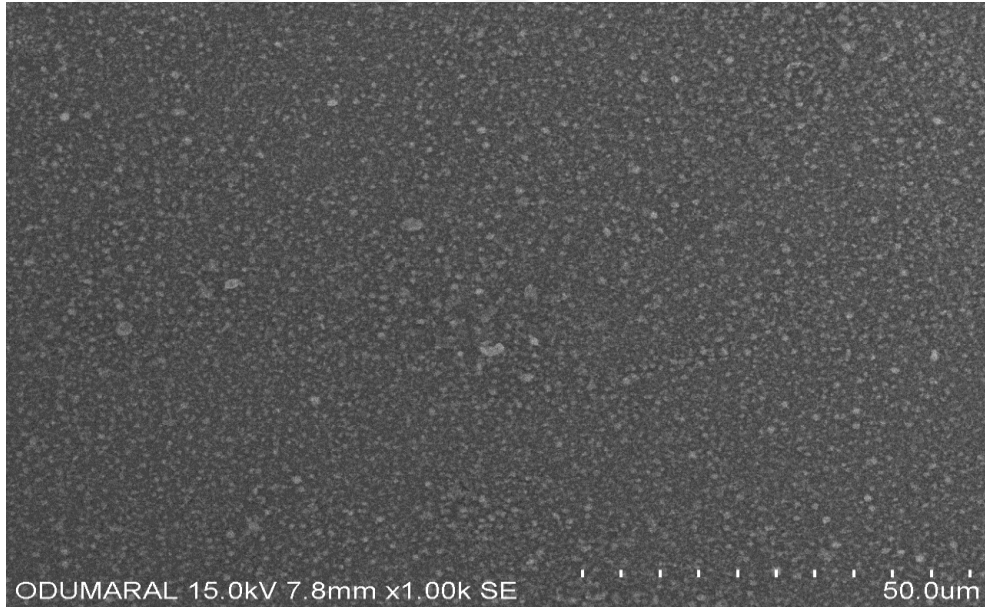
Şekil 4. 40: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



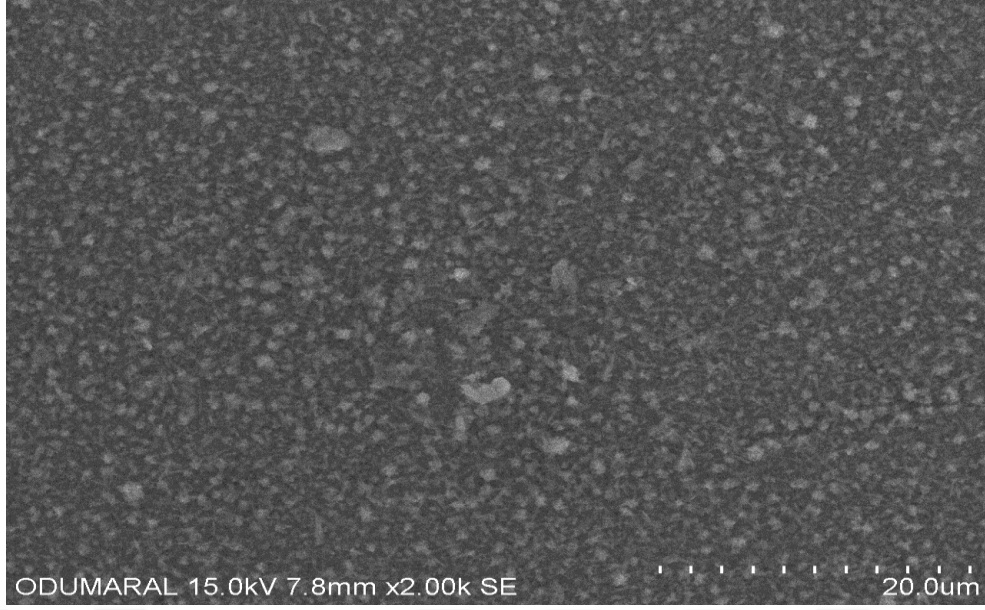
Şekil 4. 41: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.42-43'te cam/ITO/CIS(tav)/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 271 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü.



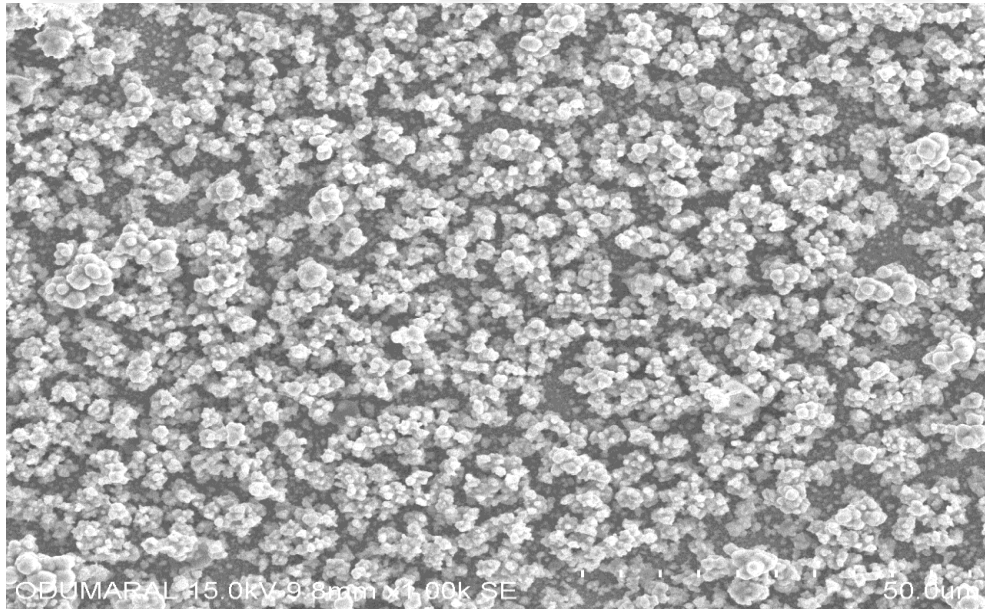
Şekil 4. 42: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



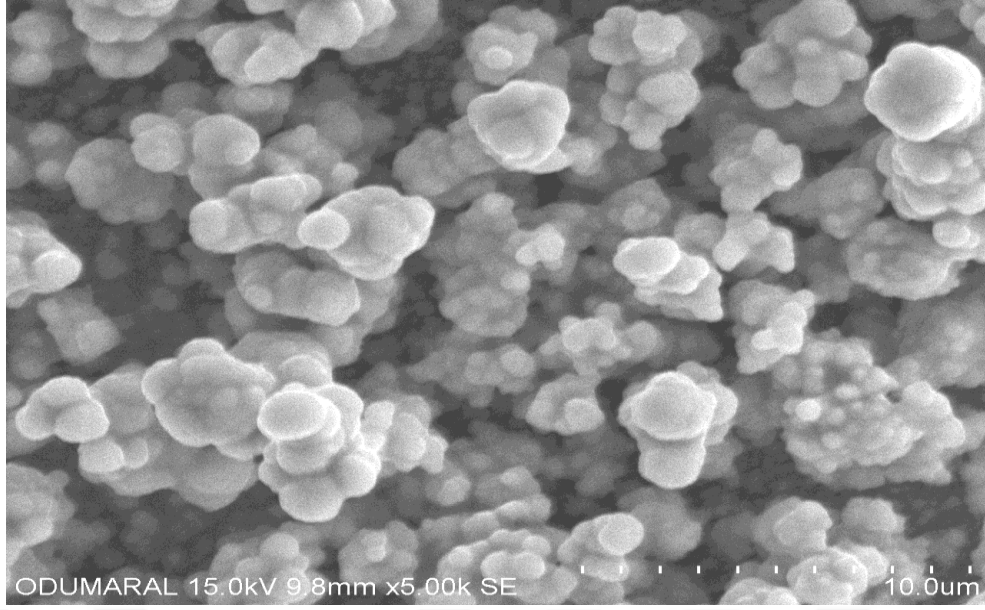
Şekil 4. 43: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin SEM analizi

Şekil 4.44-45'te cam/ITO/CIGS filminin 1000 ve 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 386 nm olarak belirlendi. Film yüzeyinin pürüzlü ve neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görüldü.



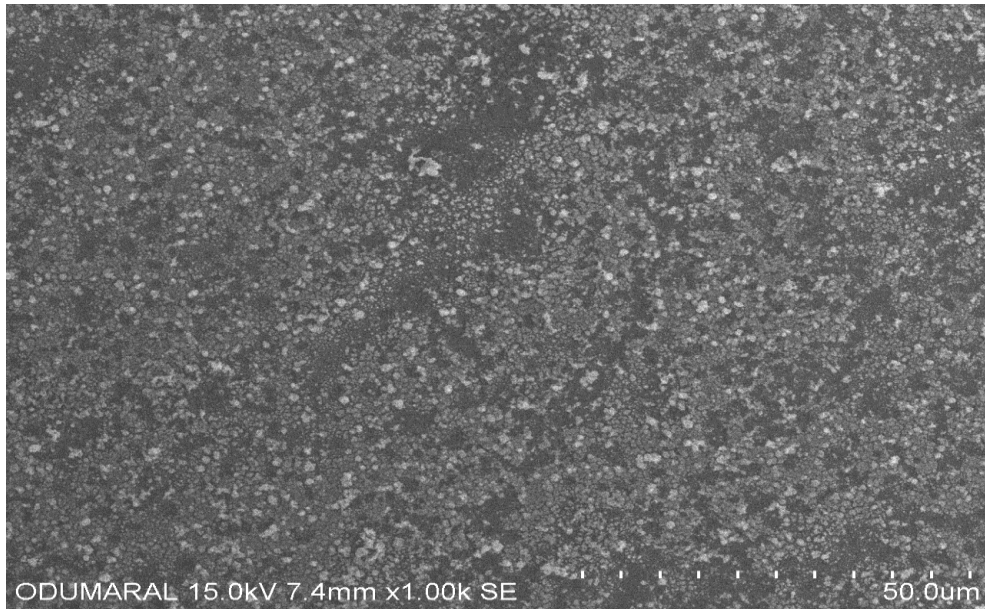
Şekil 4. 44: Cam/ITO/CIGS ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



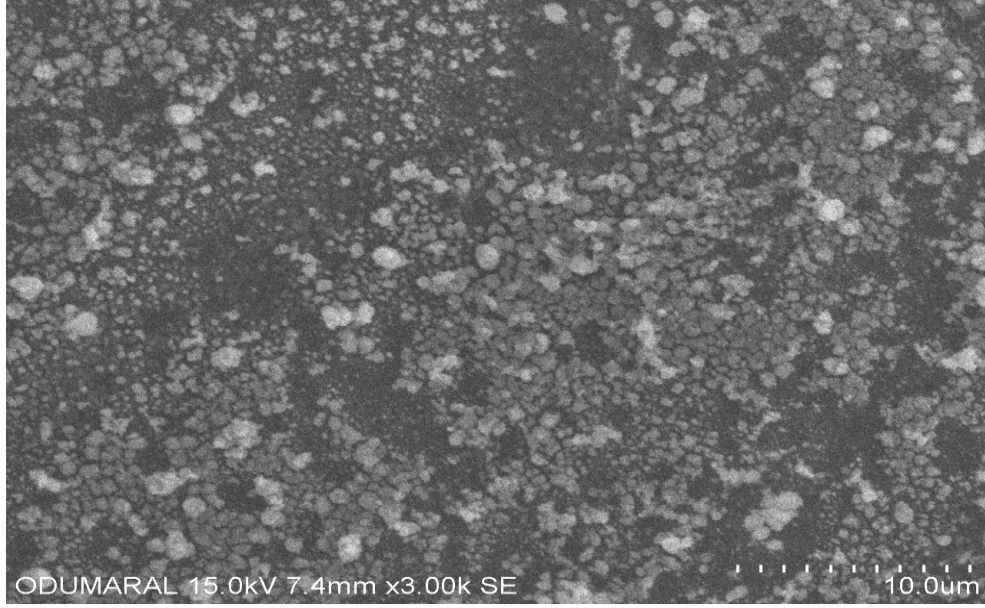
Şekil 4. 45: Cam/ITO/CIGS ince filminin 5000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin SEM analizi

Şekil 4.46-47’de cam/ITO/CIGS(tav) filminin 1000 ve 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 207 nm olarak belirlendi. Tavlama ile ince film pürüzlülüğünün azaldığı, bazı boşlukların meydana geldiği ve büyük parçacıkların ortadan kaybolduğu görüldü.



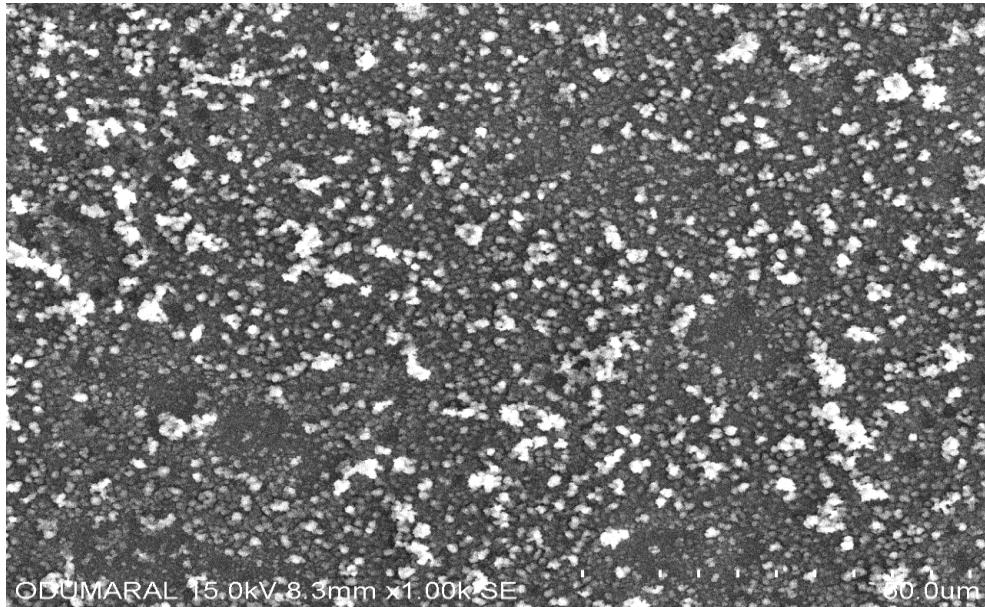
Şekil 4. 46: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



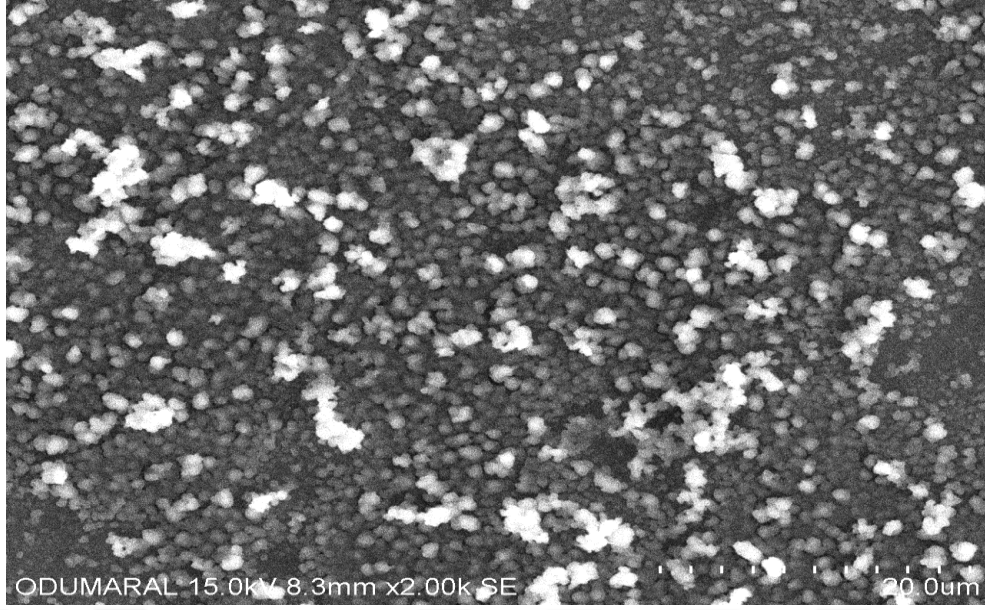
Şekil 4. 47: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin 3000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.48-49’da cam/ITO/CIGS/rubrene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 332 nm olarak belirlendi. Film yüzeyinin bazı bölgelerde topaklanmaların olduğu ve yüzeyin homojen olmayan bir dağılım sergilediği görüldü.



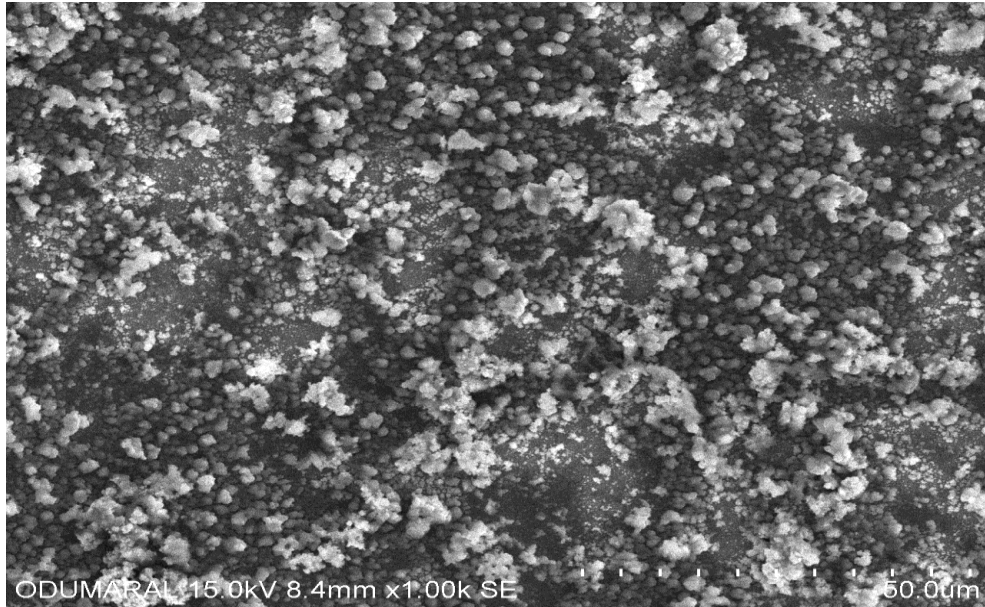
Şekil 4. 48: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



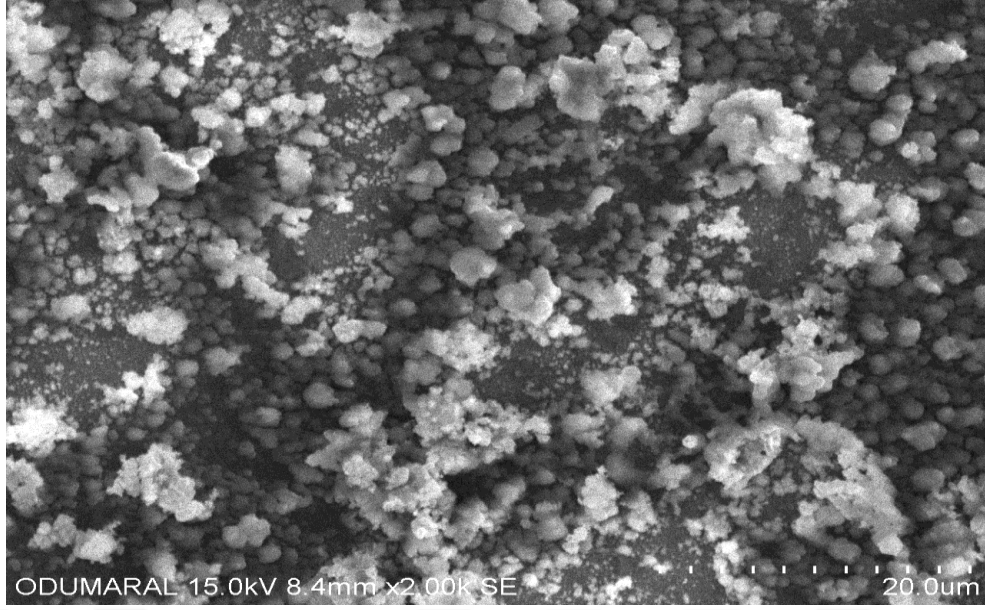
Şekil 4. 49: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.50-51’de cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 428 nm olarak belirlendi. Film yüzeyinin oldukça pürüzlü ve yüzeyin homojen olmayan bir dağılım sergilediği görüldü.



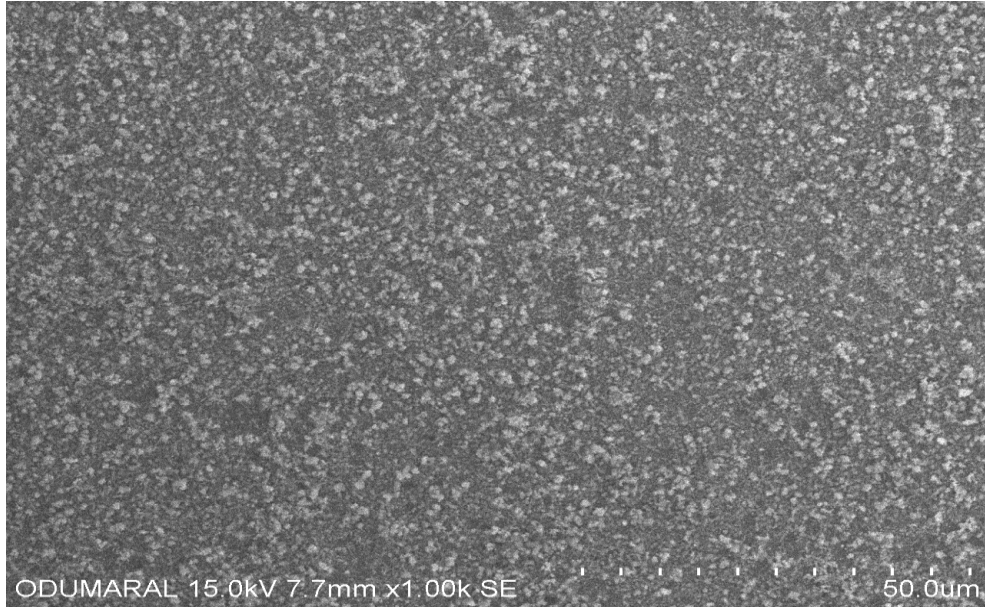
Şekil 4. 50: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



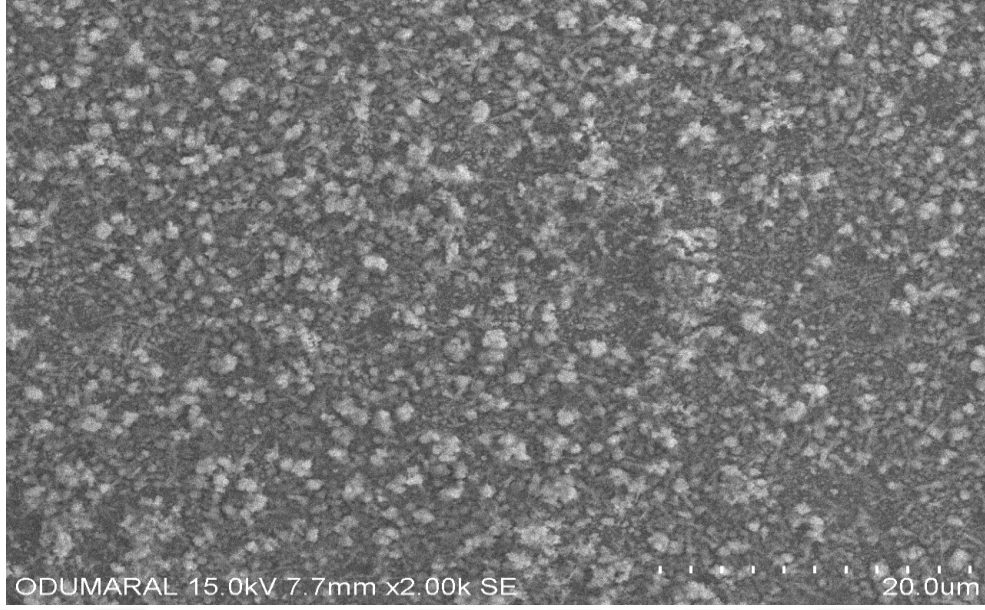
Şekil 4. 51: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.52-53'te cam/ITO/CIGS/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 214 nm olarak belirlendi. İnce film yüzeyinin neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



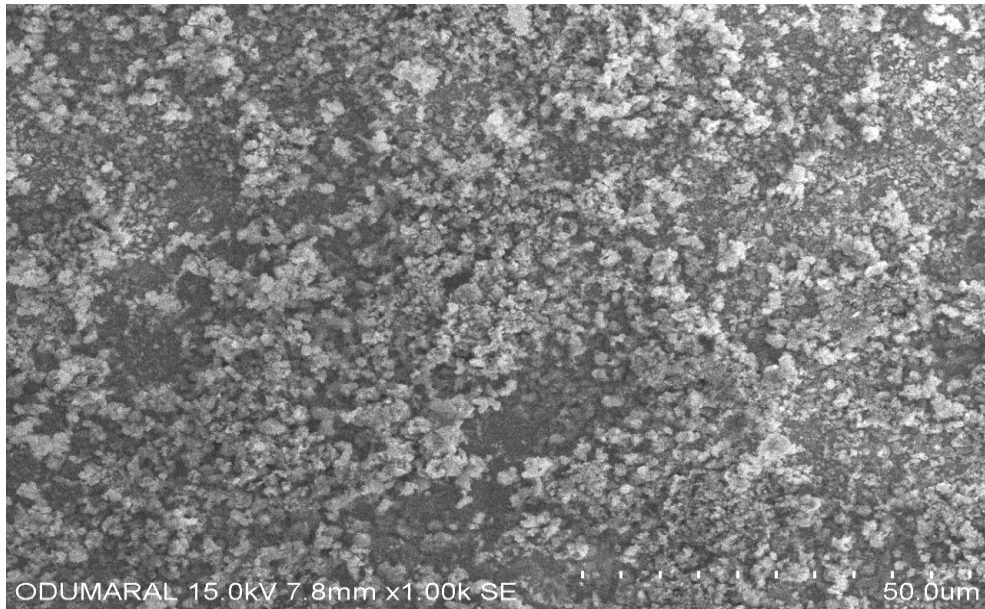
Şekil 4. 52: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.



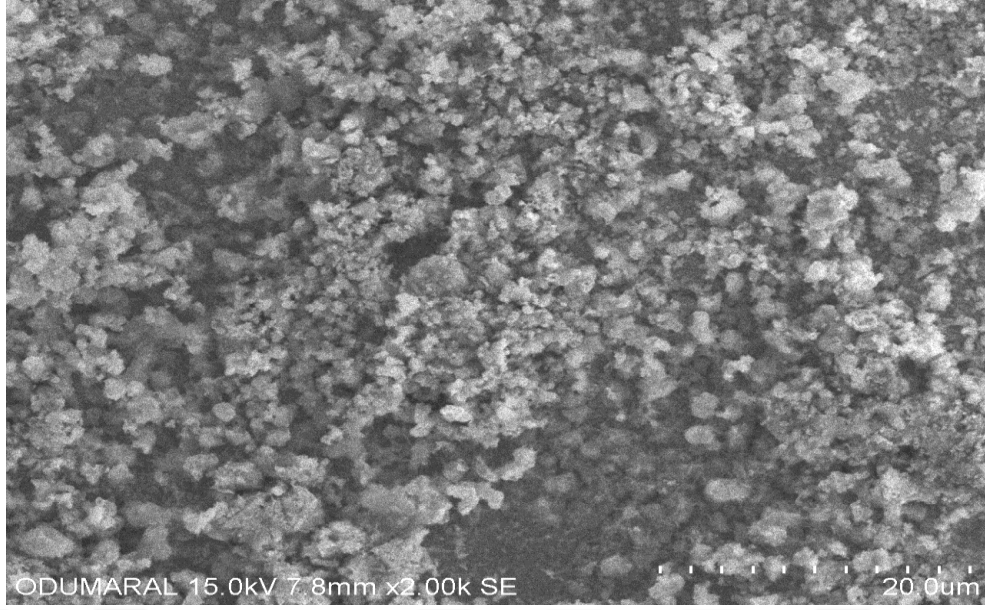
Şekil 4. 53: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

4.2.2.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin SEM analizi

Şekil 4.54-55’da cam/ITO/CIGS(tav)/coronene filminin 1000 ve 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. İnce filmin ortalama pürüzlülük değeri 259 nm olarak belirlendi. Film yüzeyinin bazı bölgelerinde boşlukların olduğu, filmin homojen olmayan bir dağılım sergilediği görüldü.



Şekil 4. 54: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin 1000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

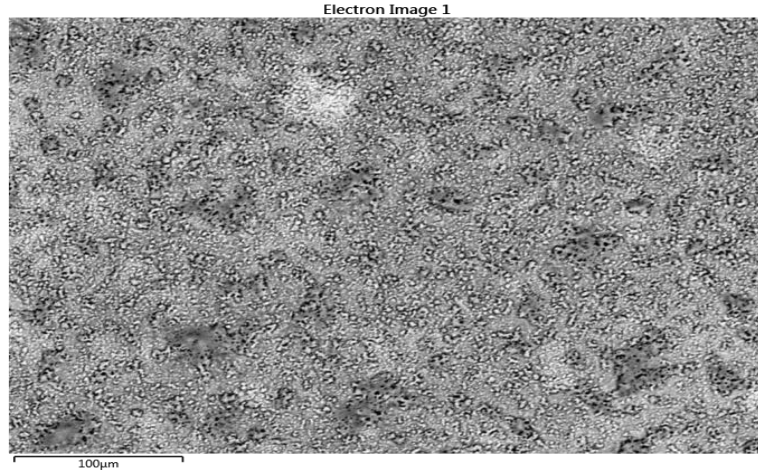


Şekil 4. 55: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin 2000 kez büyütülmüş SEM görüntüsü.

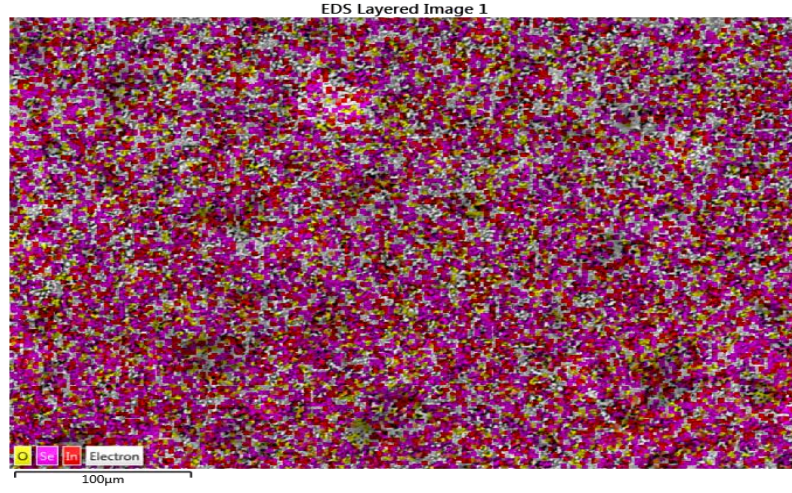
4.2.3 EDS analizi

4.2.3.1 Cam/ITO/InSe ince filminin EDS analizi

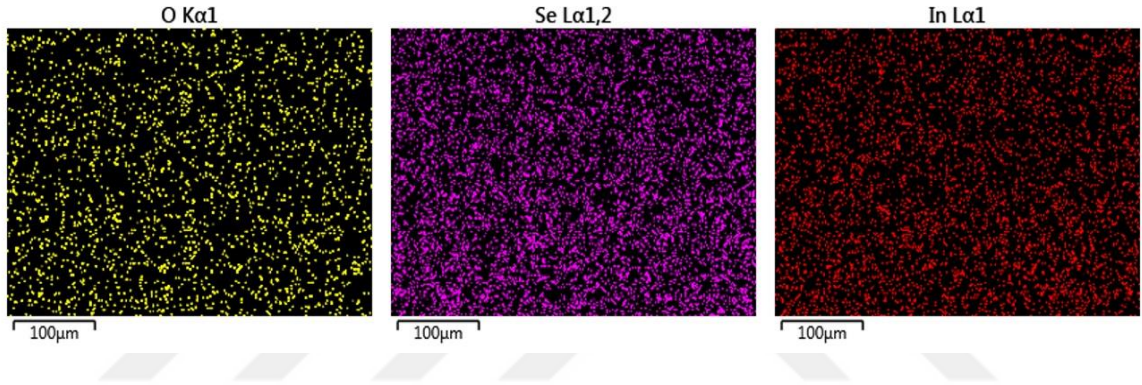
Şekil 4.56-57-58’de cam/ITO/InSe ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. In ve Se atomlarının filmin neredeyse tamamında homojen bir şekilde dağıldıkları görülmektedir.



Şekil 4. 56: Cam/ITO/InSe ince filminin elektron fotoğrafı.



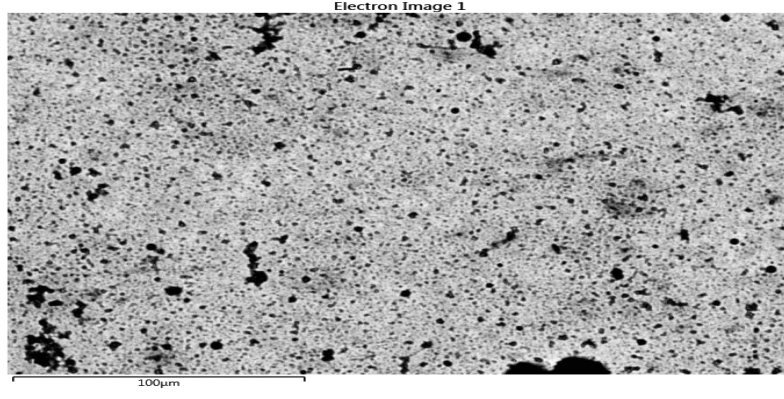
Şekil 4. 57: Cam/ITO/InSe ince filminin EDS fotoğrafı.



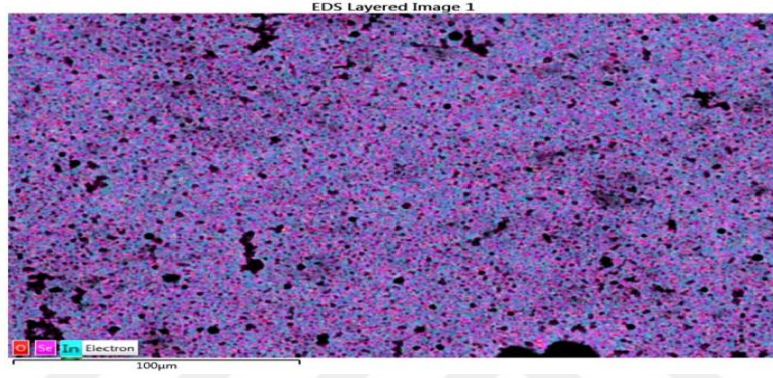
Şekil 4. 58: Cam/ITO/InSe ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.3.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin EDS analizi

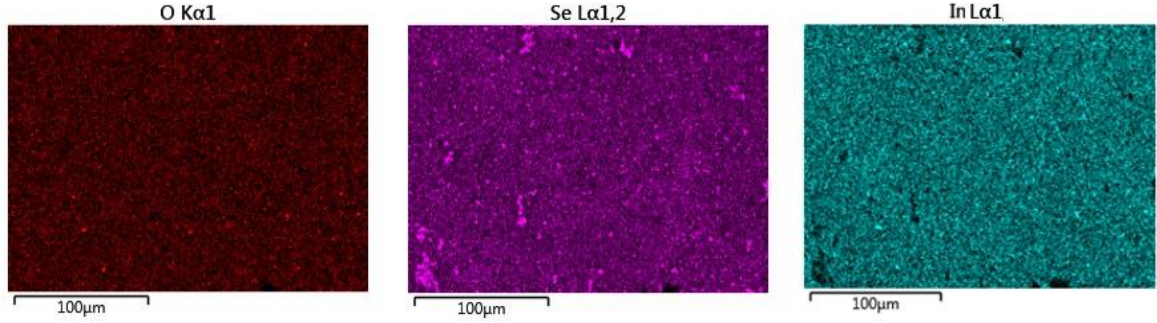
Şekil 4.59-60-61’de cam/ITO/InSe(tav) ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. Film yüzeyinde tavlama ile birlikte çatlakların ve boşlukların ortaya çıktığı görülmektedir. In ve Se atomlarının filmin neredeyse tamamında homojen bir şekilde dağıldıkları ve tavlama öncesine göre daha sıkı paketler halinde bir arada oldukları görülmektedir.



Şekil 4. 59: Cam/ITO/InSe(tav) filminin elektron fotoğrafı.



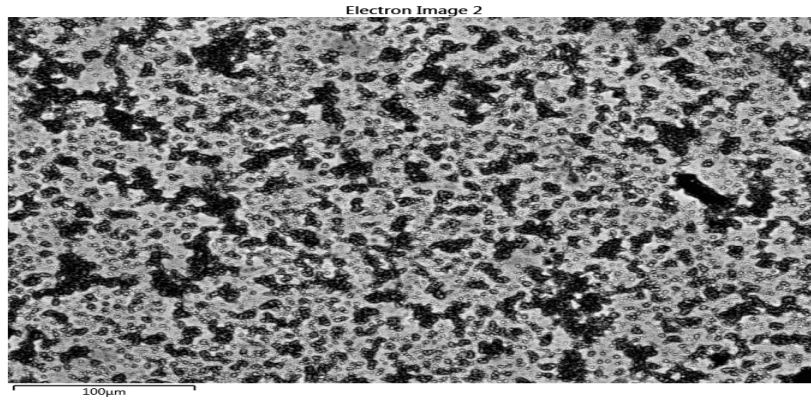
Şekil 4. 60: Cam/ITO/InSe(tav) filminin EDS fotoğrafı.



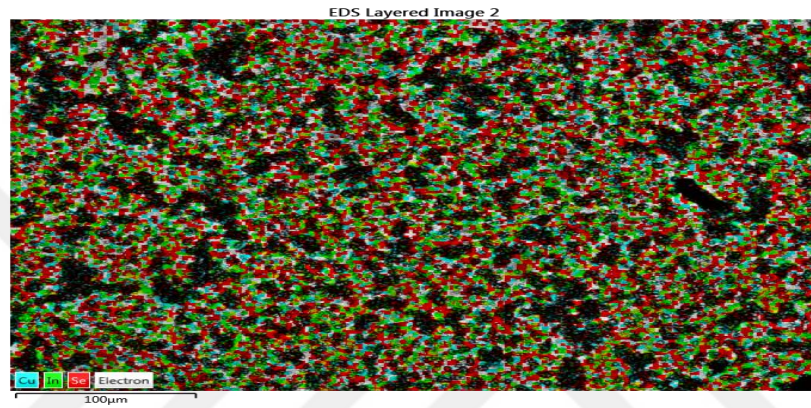
Şekil 4. 61: Cam/ITO/InSe(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.3.3 Cam/ITO/CIS ince filminin EDS analizi

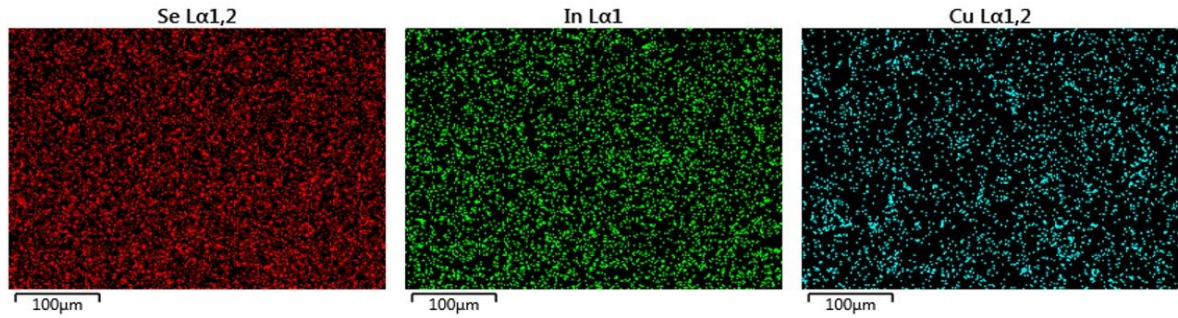
Şekil 4.62-63-64'te cam/ITO/CIS ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. Filmin bazı bölgelerinde boşlukların var olduğu boşluk olmayan kısımlarda Cu, In ve Se atomlarının homojen bir şekilde dağıldıkları görülmektedir.



Şekil 4. 62: Cam/ITO/CIS filminin elektron fotoğrafı.



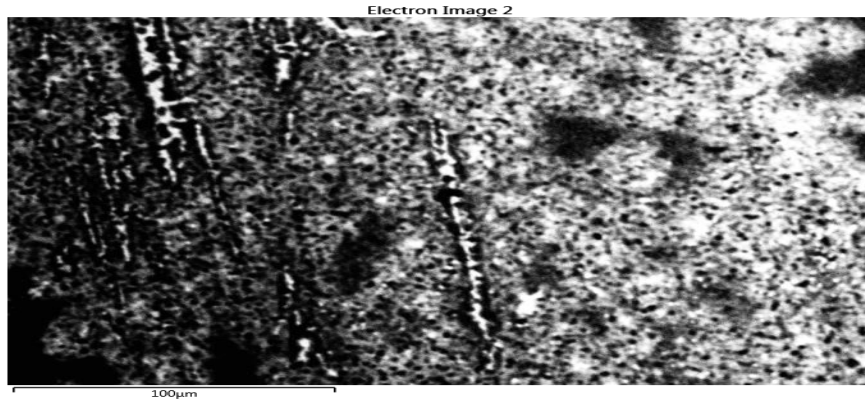
Şekil 4. 63: Cam/ITO/CIS filminin EDS fotoğrafı.



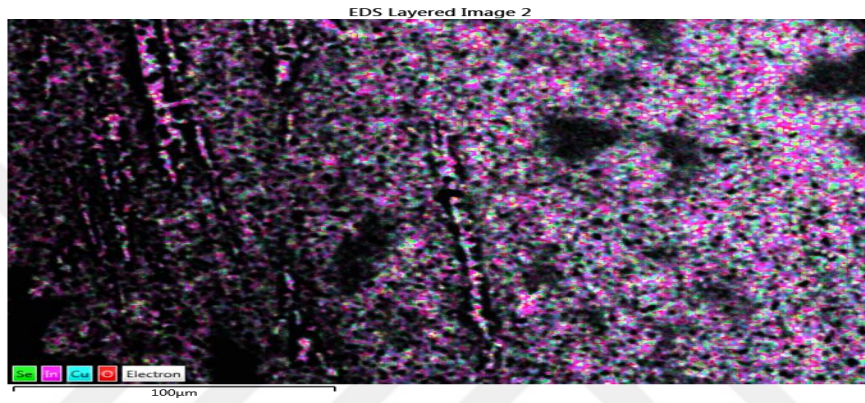
Şekil 4. 64: Cam/ITO/CIS ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.3.4 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin EDS analizi

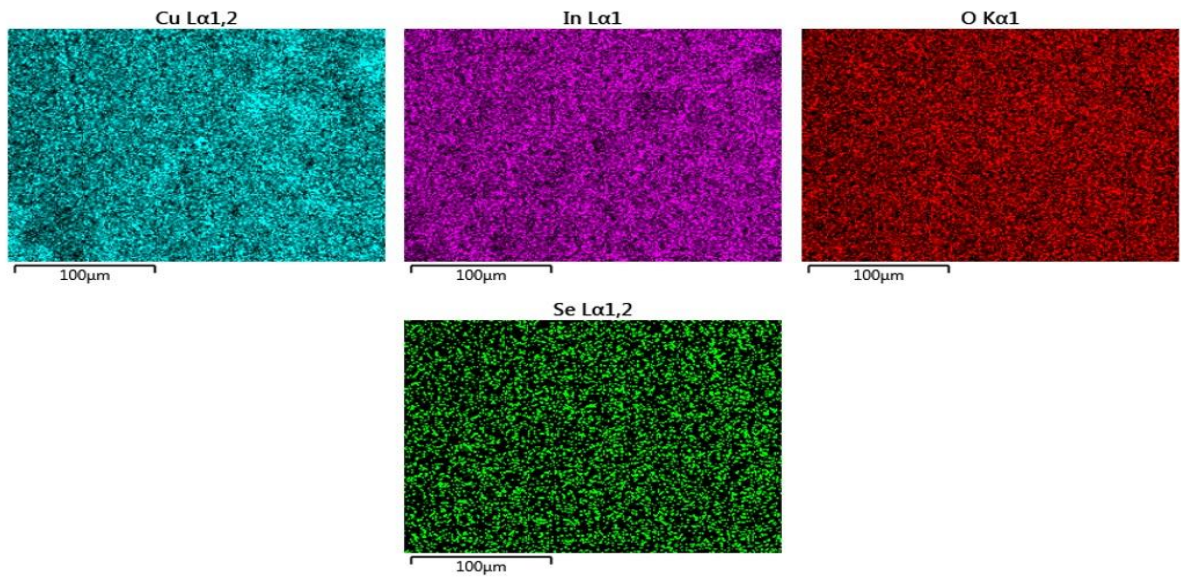
Şekil 4.65-66-67’de cam/ITO/CIS(tav) ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. Tavlamayla birlikte O atomlarının varlığı görülmektedir. Tavlama öncesine göre Cu, In ve Se atomlarının daha sıkı paketler halinde bir arada oldukları görülmektedir.



Şekil 4. 65: Cam/ITO/CIS(tav) filminin elektron fotoğrafı.



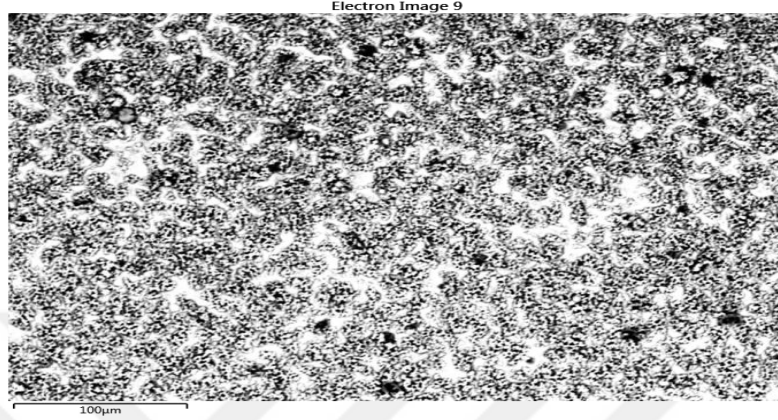
Şekil 4. 66: Cam/ITO/CIS(tav) filminin EDS fotoğrafı.



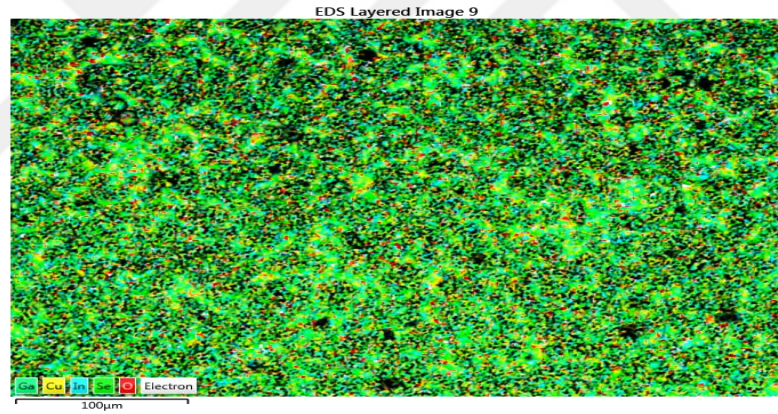
Şekil 4. 67: Cam/ITO/CIS(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.3.5 Cam/ITO/CIGS ince filminin EDS analizi

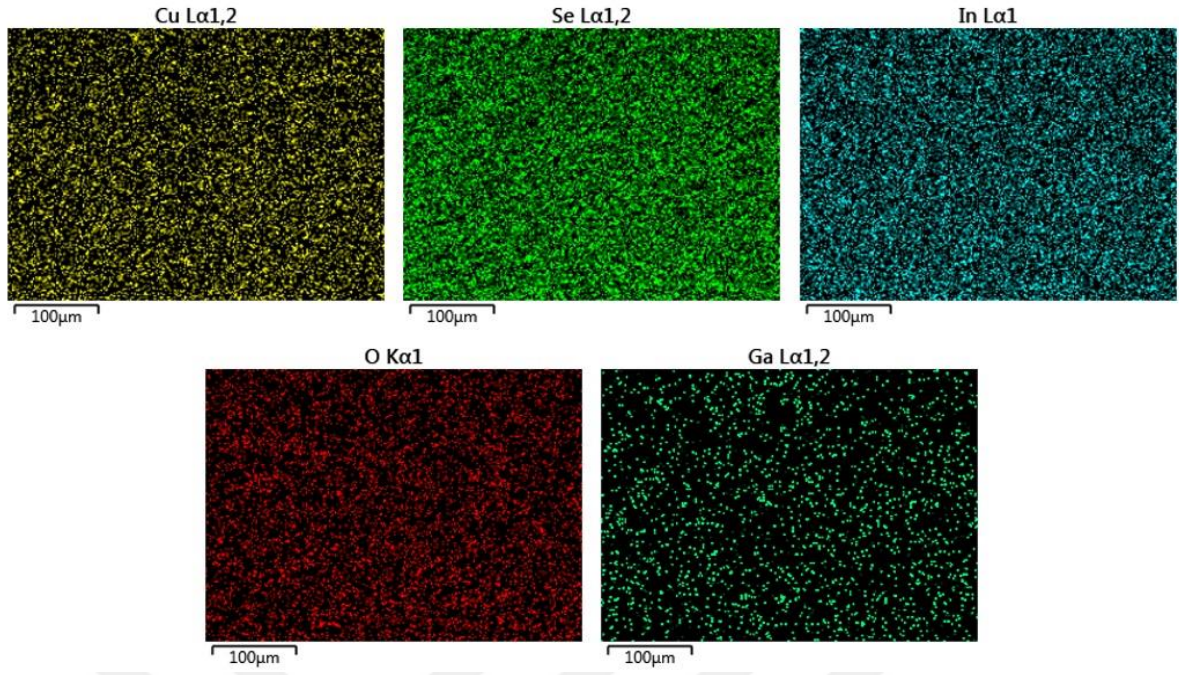
Şekil 4.68-69-70’de cam/ITO/CIGS ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. Cu, Ga, In ve Se atomlarının filmin neredeyse tamamında homojen bir şekilde dağıldıkları, Ga atomlarının diğer atomlara oranla daha seyrek bir şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. 68: Cam/ITO/CIGS filminin elektron fotoğrafı.



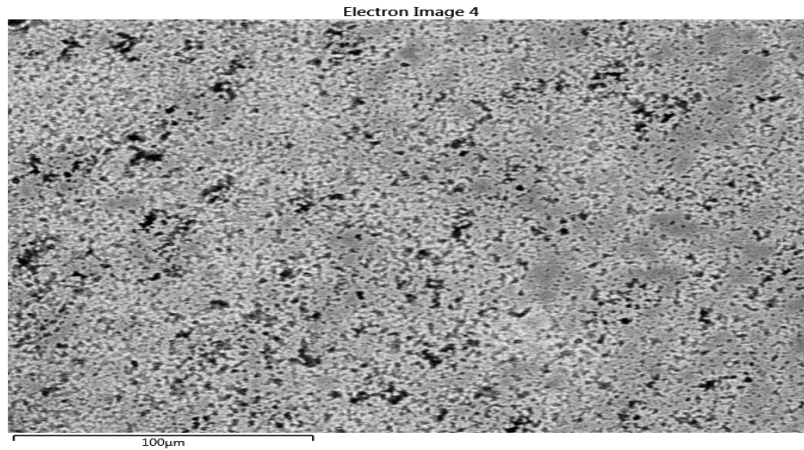
Şekil 4. 69: Cam/ITO/CIGS filminin EDS fotoğrafı.



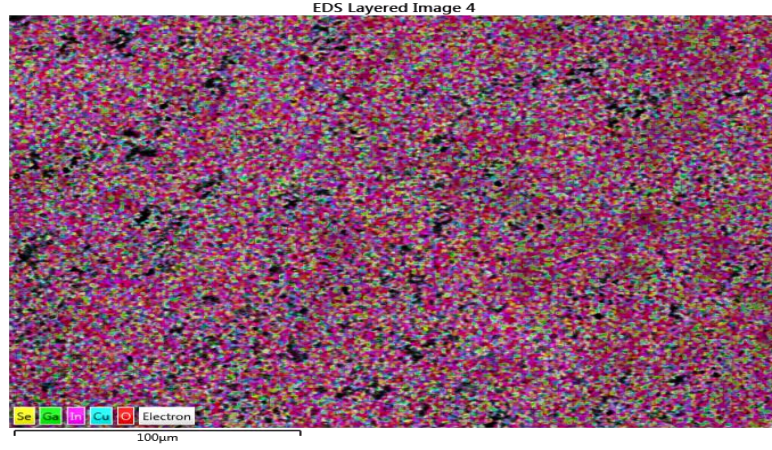
Şekil 4. 70: Cam/ITO/CIGS ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.3.6 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin EDS analizi

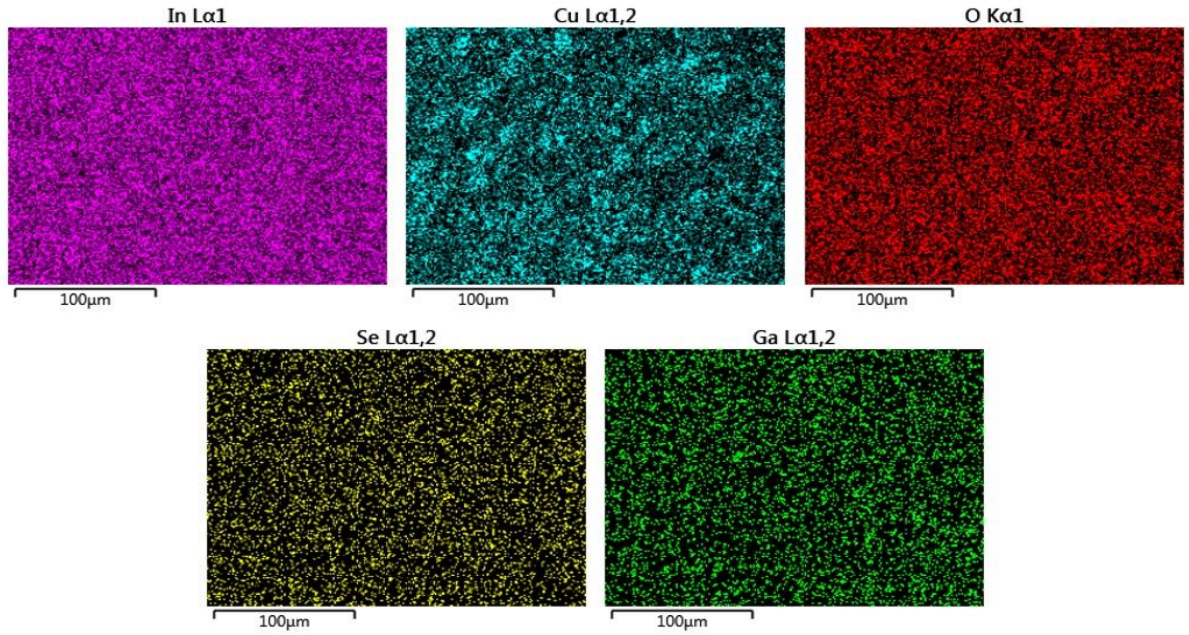
Şekil 4.71-72-73'te cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin sırasıyla elektron, EDS ve elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafları verilmiştir. Cu, Ga, In ve Se atomlarının filmin neredeyse tamamında homojen bir şekilde dağıldıkları, tavlama öncesine göre daha sıkı paketler halinde var oldukları ve Ga atomlarının tavlama öncesine göre dağılım oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 71: Cam/ITO/CIGS(tav) filminin elektron fotoğrafı.



Şekil 4. 72: Cam/ITO/CIGS(tav) filminin EDS fotoğrafı.



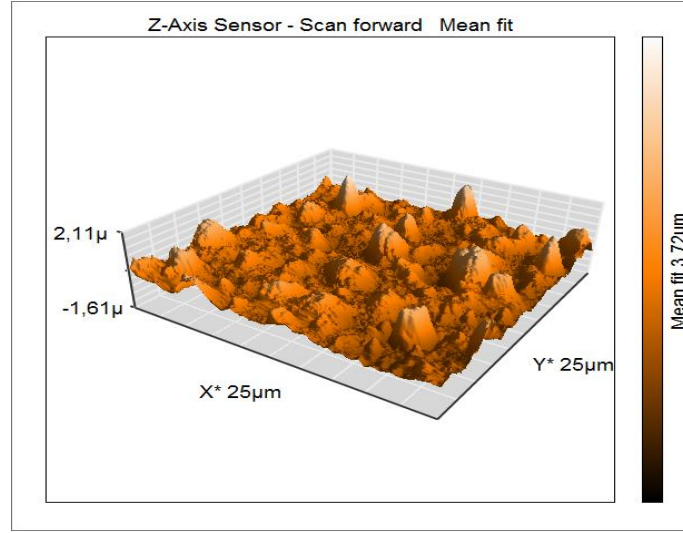
Şekil 4. 73: Cam/ITO/CIGS(tav) ince film elementlerinin ayrı ayrı dağılım fotoğrafı.

4.2.4 AFM analizi

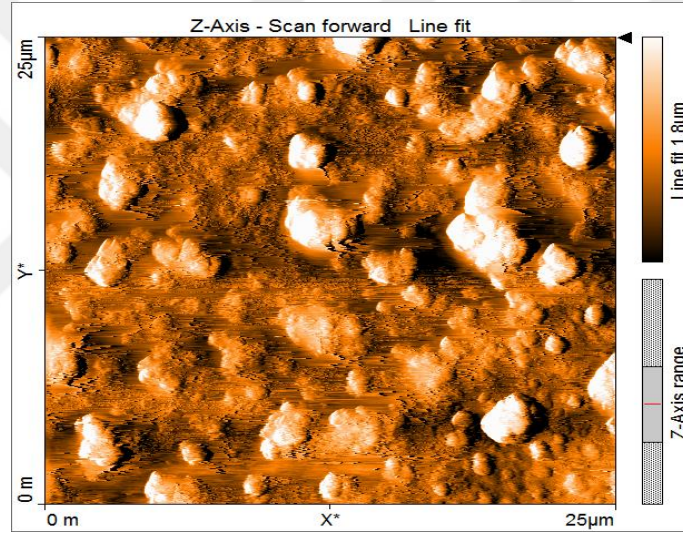
AFM analizleri 25x25 µm tarama alanında, tap 190-A1G cantilever kullanılarak atmosfer ortamında, dinamik modda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

4.2.4.1 Cam/ITO/InSe ince filminin AFM analizi

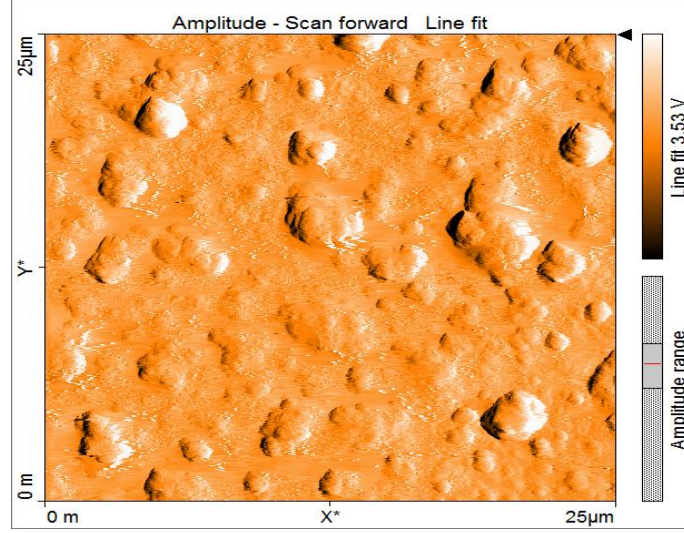
Şekil 4.74-75-76 da cam/ITO/InSe ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO üzerine büyütülen InSe ince filminin 25x25 µm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=222,07 nm, en düşük derinlik değeri=-721,99 nm, en yüksek tepe değeri=1630,6 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 74: Cam/ITO/InSe ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



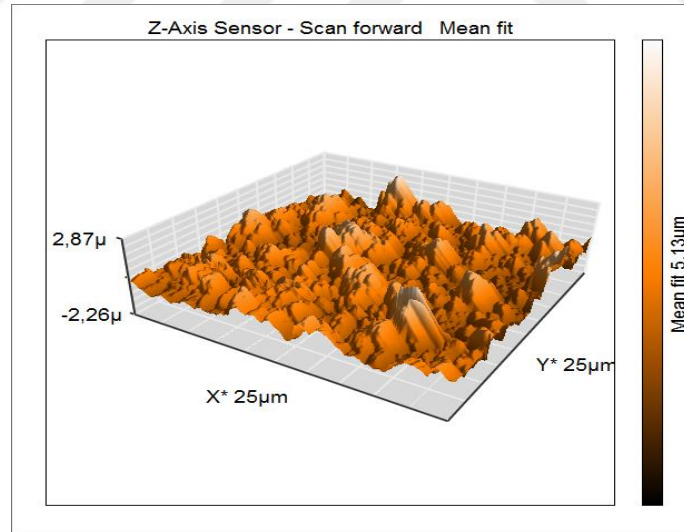
Şekil 4. 75: Cam/ITO/InSe ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



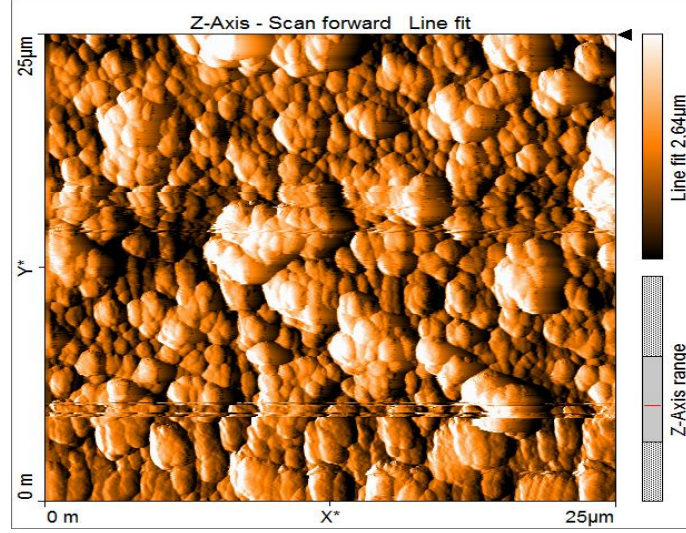
Şekil 4. 76: Cam/ITO/InSe ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin AFM analizi

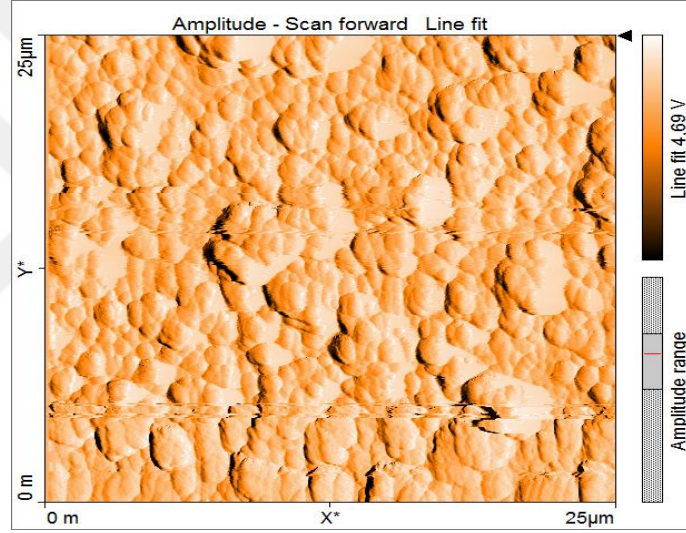
Şekil 4.77-78-79’de cam/ITO/InSe(tav) ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan InSe ince filminin 25x25µm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=364,72 nm, en düşük derinlik değeri=-1204,9 nm, en yüksek tepe değeri=2241 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 77: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



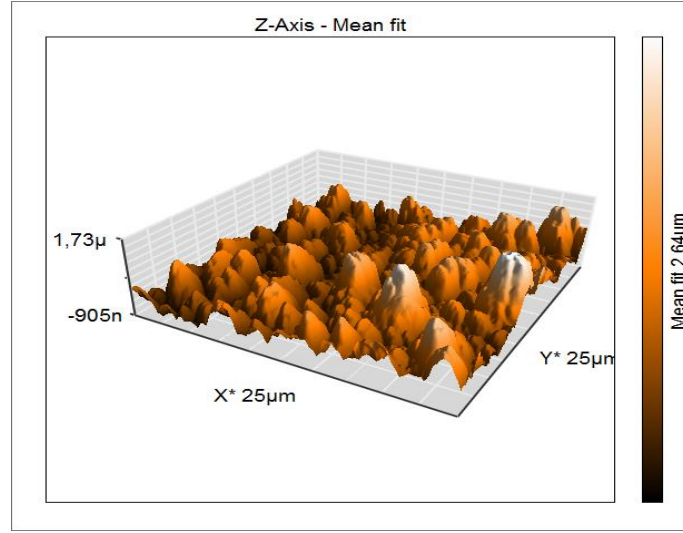
Şekil 4. 78: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



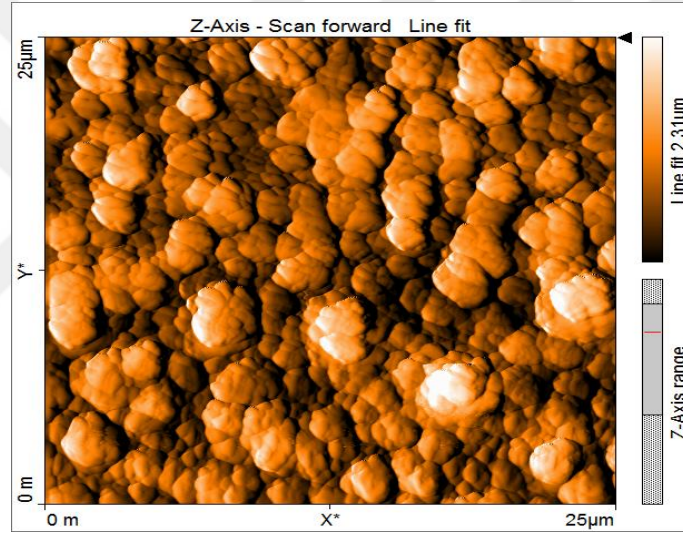
Şekil 4. 79: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin AFM analizi

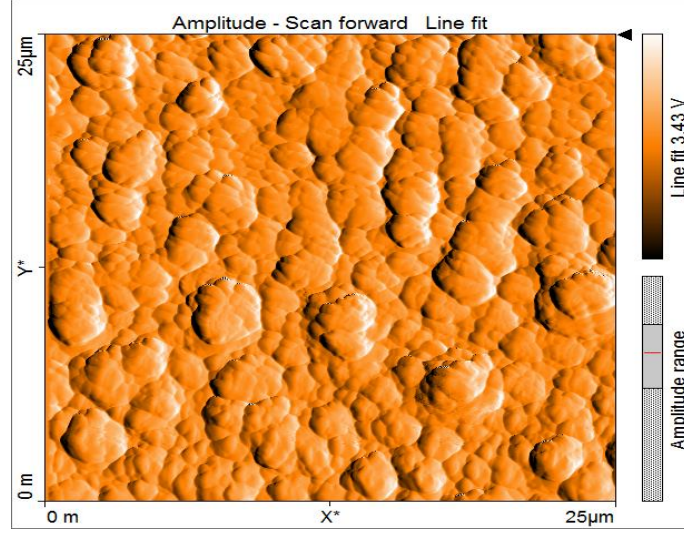
Şekil 4.80-81-82’de cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen rubrene ince filminin 25x25 µm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=283,27 nm, en düşük derinlik değeri=-837,31 nm, en yüksek tepe değeri=1559,5 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 80: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



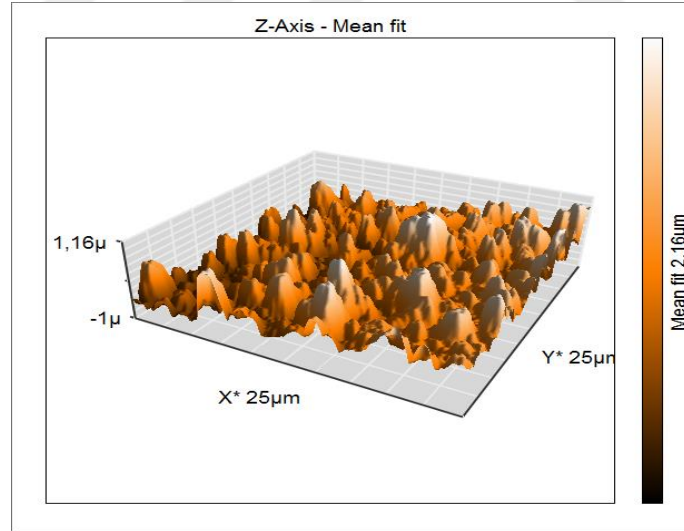
Şekil 4. 81: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



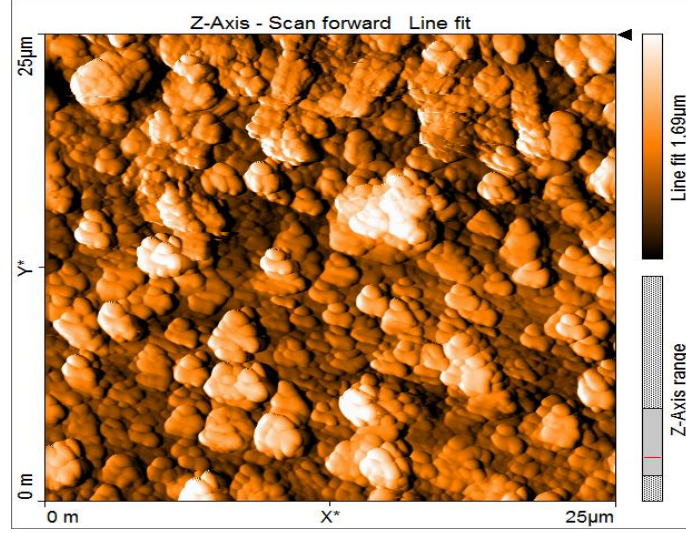
Şekil 4. 82: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi

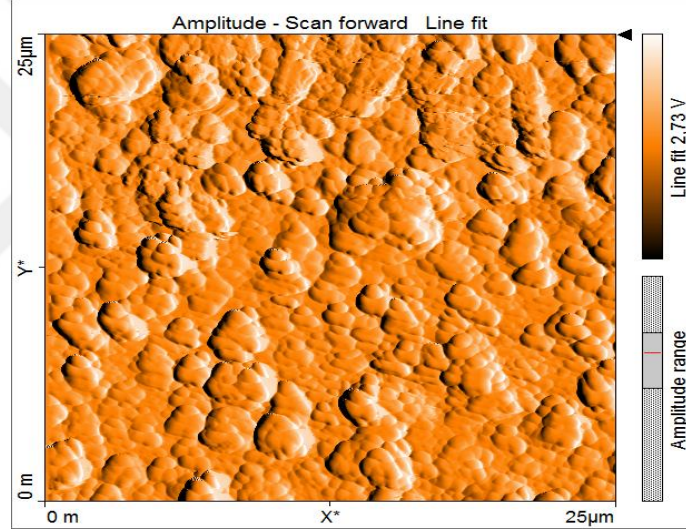
Şekil 4.83-84-85’de cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=229,51 nm, en düşük derinlik değeri=-948,64 nm, en yüksek tepe değeri=1099,6 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 83: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



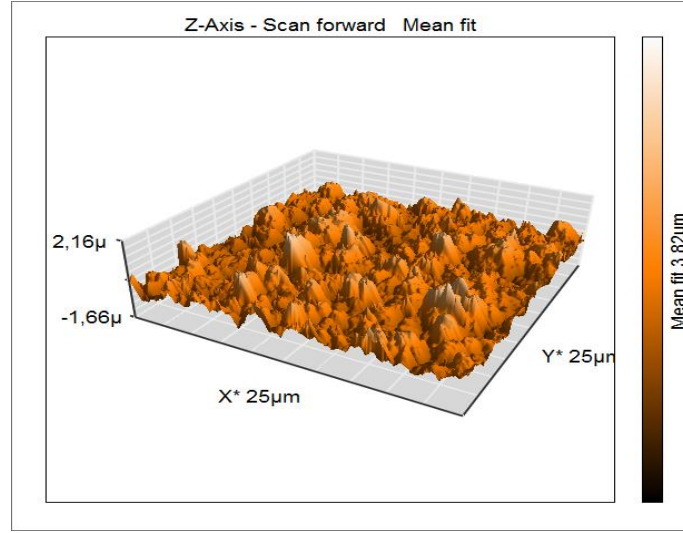
Şekil 4. 84: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



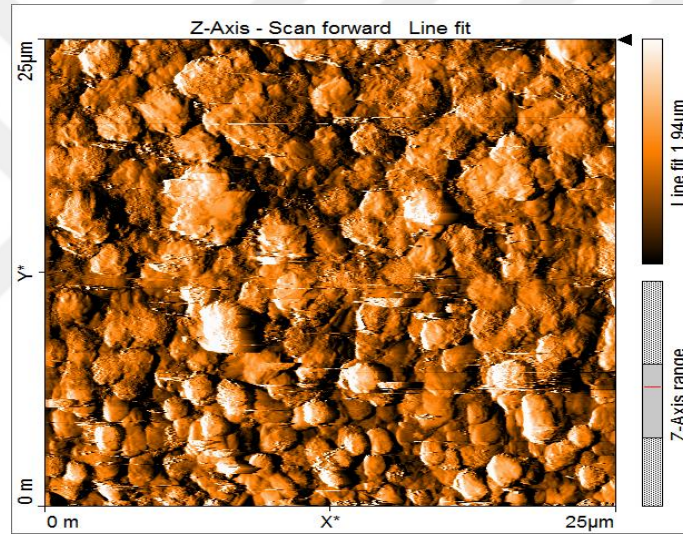
Şekil 4. 85: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin AFM analizi

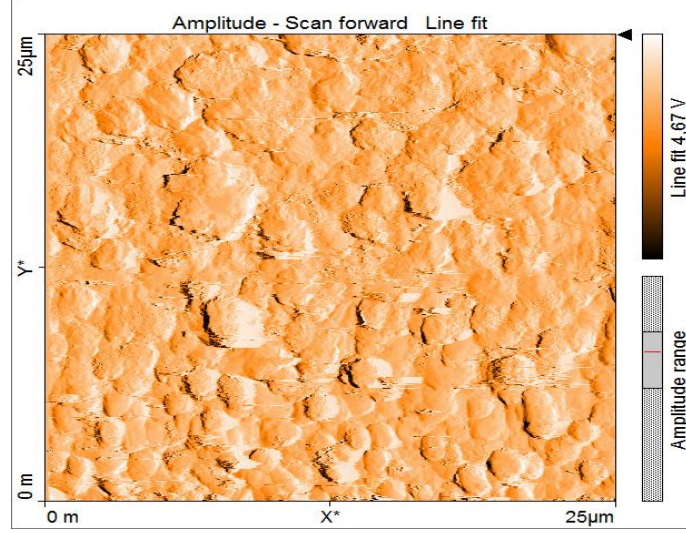
Şekil 4.86-87-88’de cam/ITO/InSe/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen coronene ince filminin 25x25μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=228,89 nm, en düşük derinlik değeri=-906,48 nm, en yüksek tepe değeri=1792,1 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 86: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



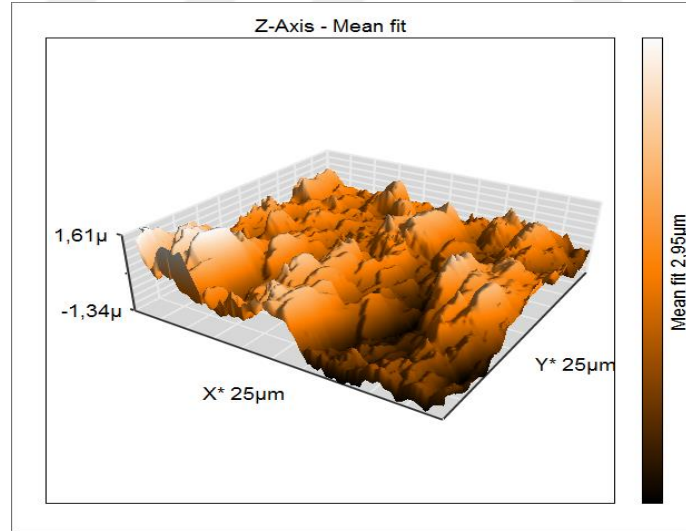
Şekil 4. 87: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



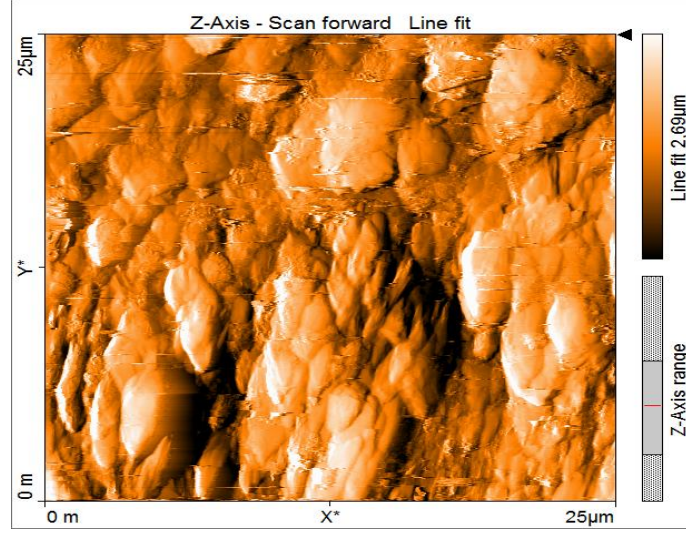
Şekil 4. 88: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin AFM analizi

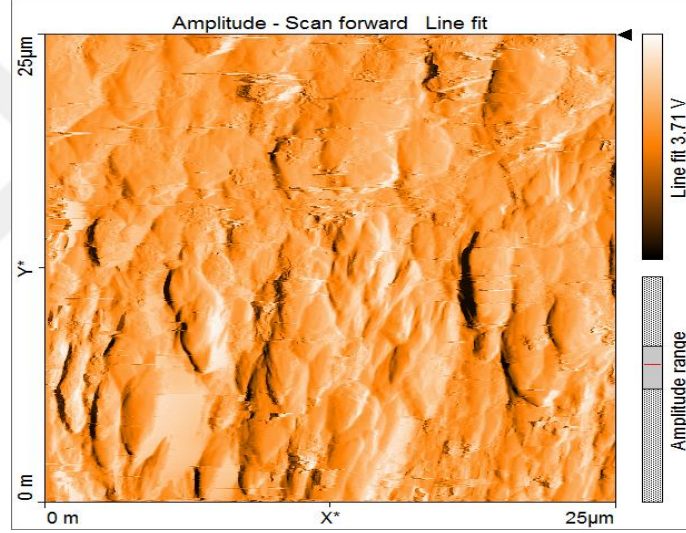
Şekil 4.89-90-91’de cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=316,36 nm, en düşük derinlik değeri=-1308,8 nm, en yüksek tepe değeri=1683,5 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 89: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



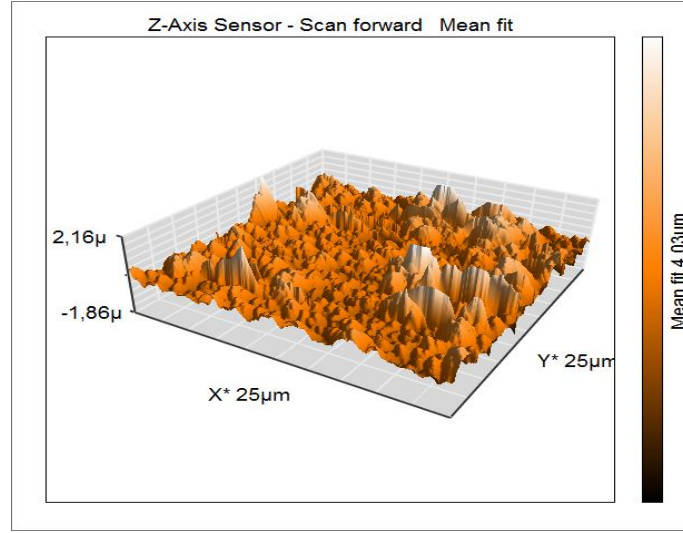
Şekil 4. 90: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



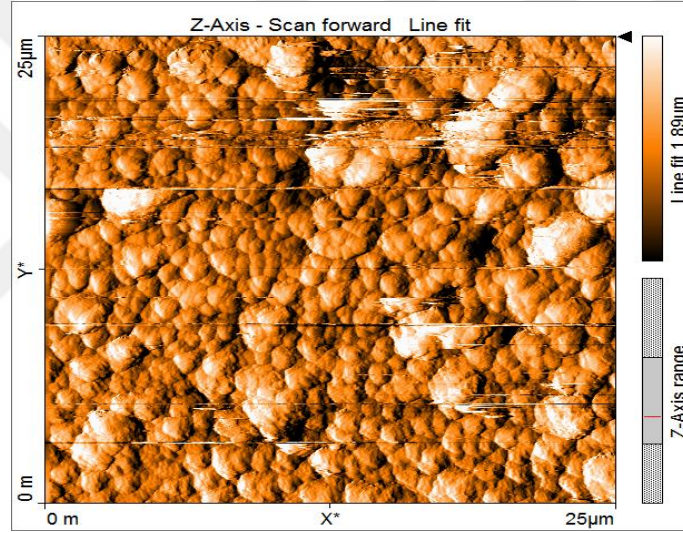
Şekil 4. 91: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.7 Cam/ITO/CIS ince filminin AFM analizi

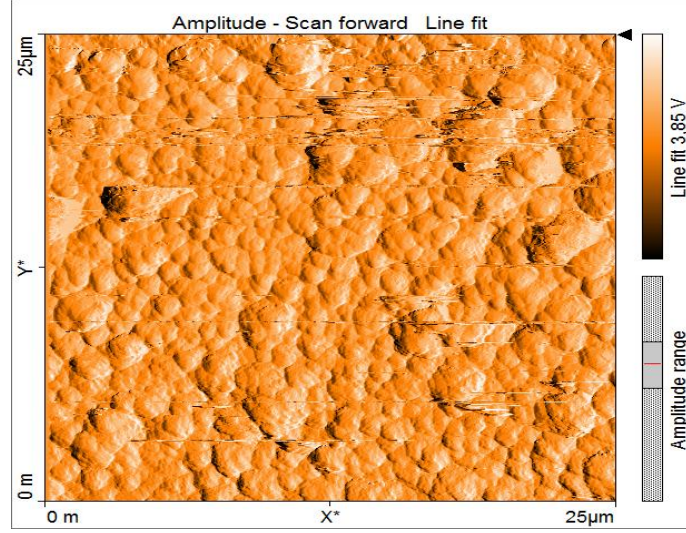
Şekil 4.92-93-94’de cam/ITO/CIS ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=231,6 nm, en düşük derinlik değeri=-1405,6 nm, en yüksek tepe değeri=2412,2 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 92: Cam/ITO/CIS ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



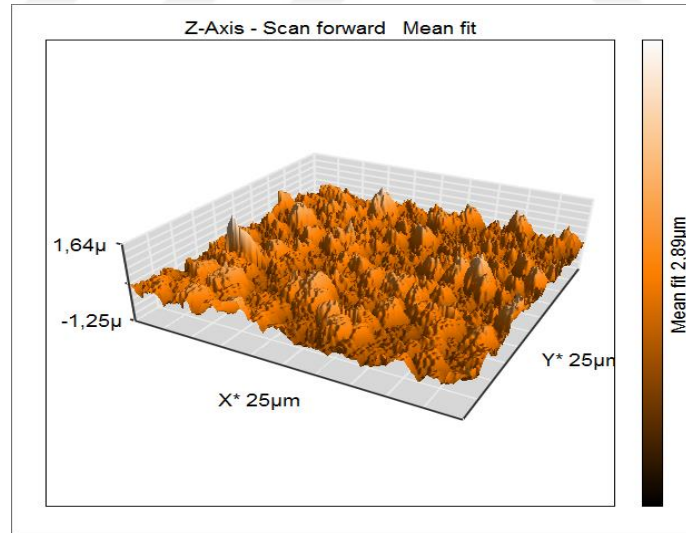
Şekil 4. 93: Cam/ITO/CIS ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



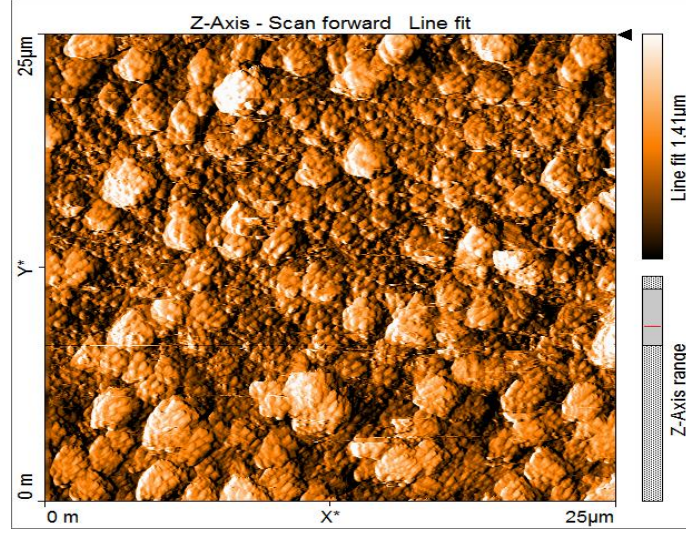
Şekil 4. 94: Cam/ITO/CIS ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin AFM analizi

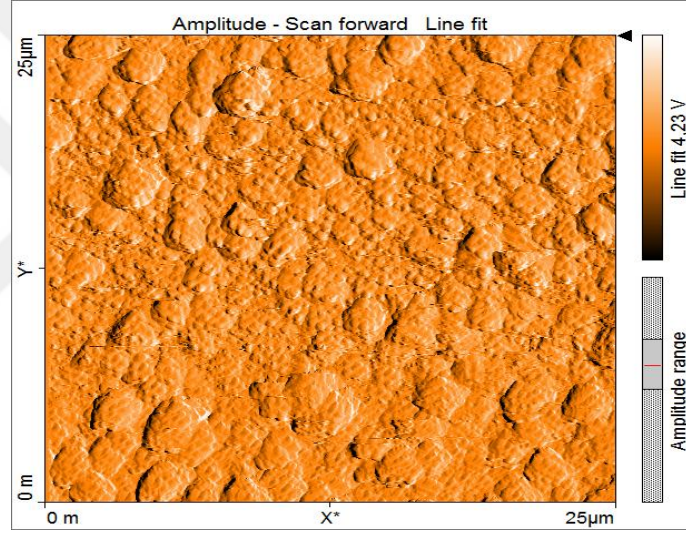
Şekil 4.95-96-97’de cam/ITO/CIS(tav) ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=185,5 nm, en düşük derinlik değeri=-721,54 nm, en yüksek tepe değeri=1534,4 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 95: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



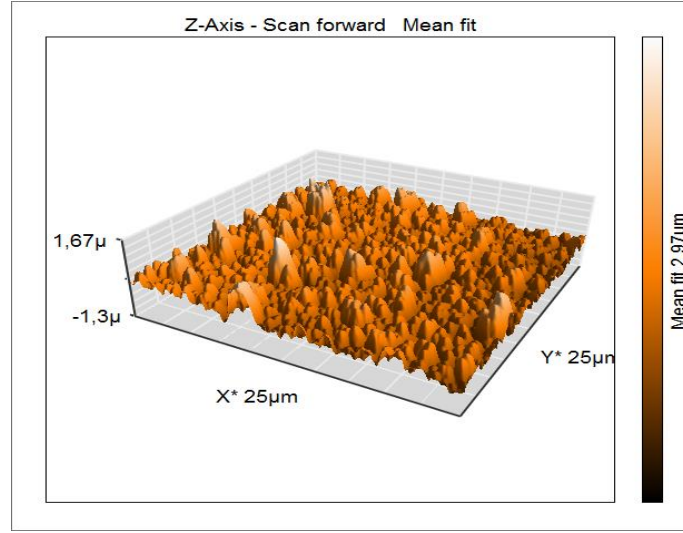
Şekil 4. 96: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



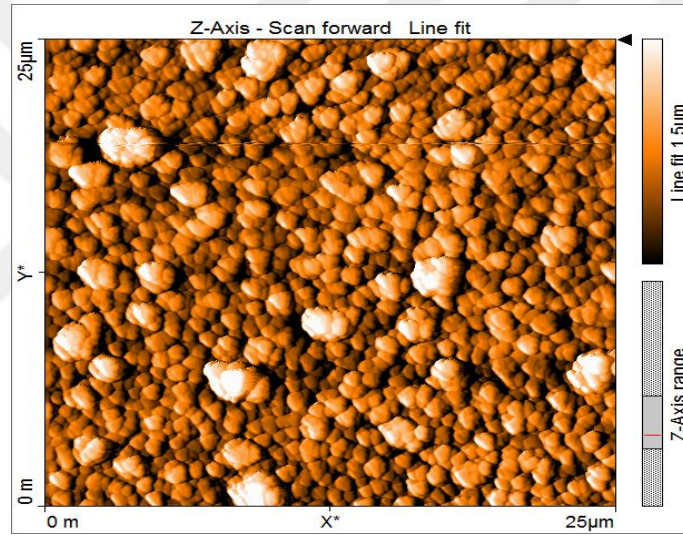
Şekil 4. 97: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin AFM analizi

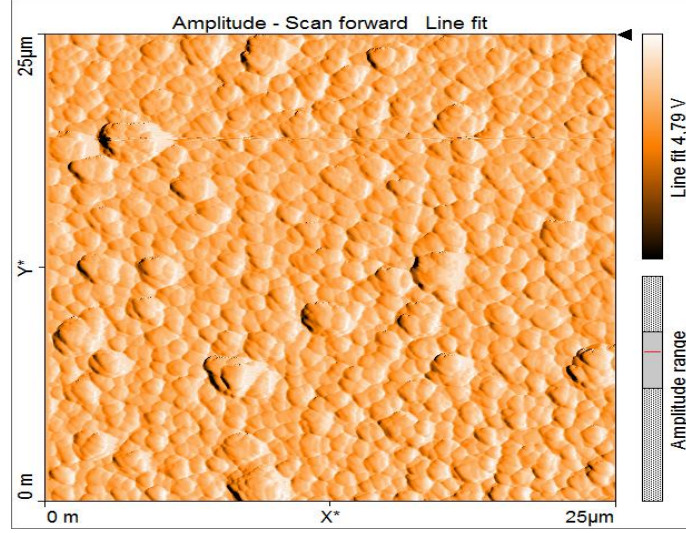
Şekil 4.98-99-100’de cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen rubrene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=182,82 nm, en düşük derinlik değeri=-1019,8 nm, en yüksek tepe değeri=1459,5 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 98: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



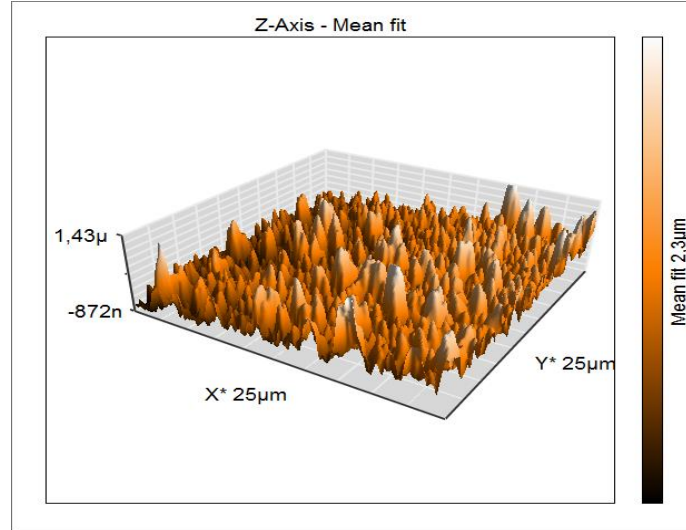
Şekil 4. 99: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



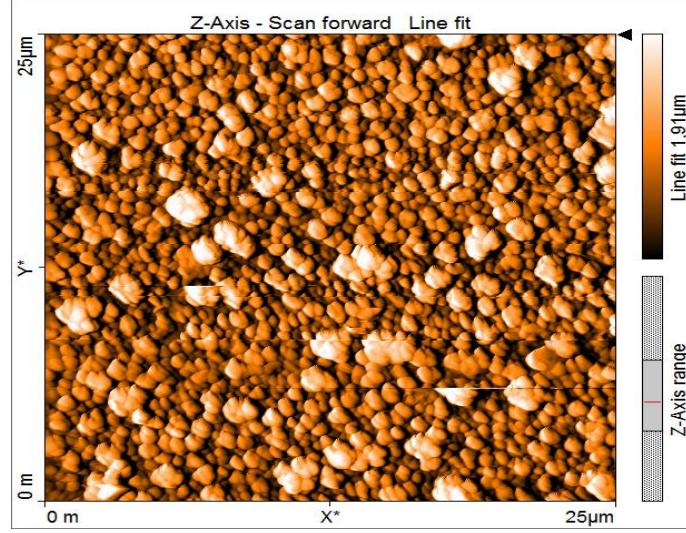
Şekil 4. 100: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi

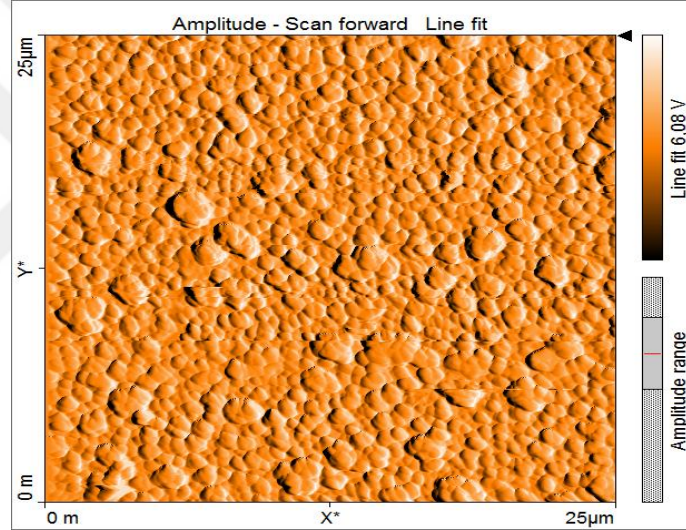
Şekil 4.101-102-103’de cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=254,46 nm, en düşük derinlik değeri=-915,37 nm, en yüksek tepe değeri=1652 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 101: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



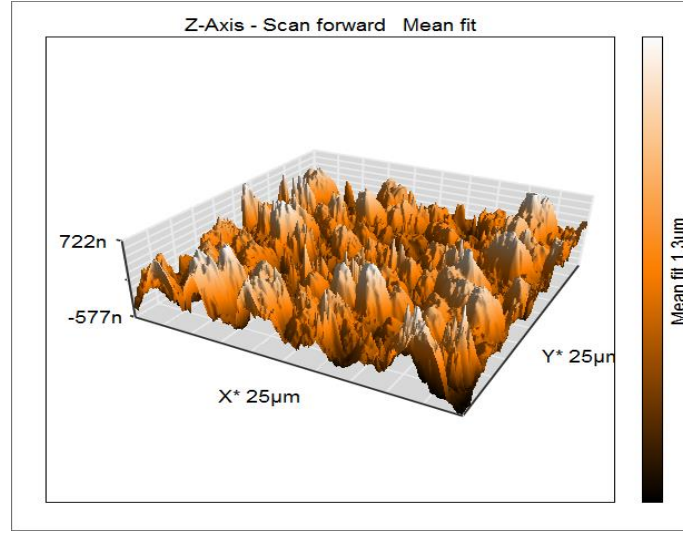
Şekil 4. 102: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



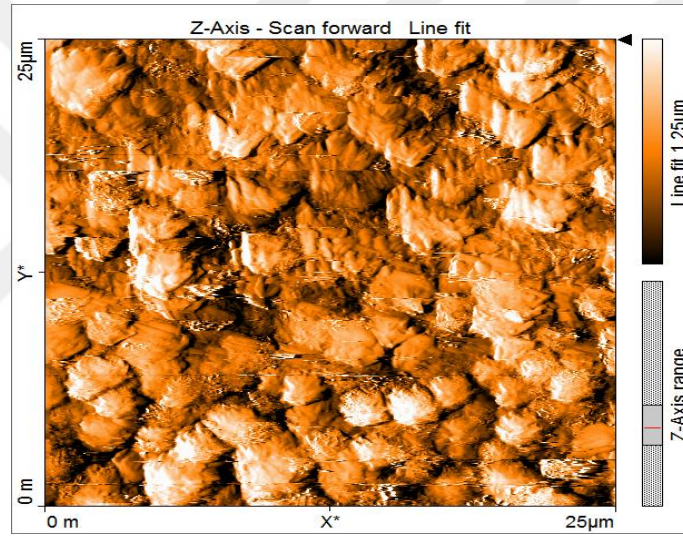
Şekil 4. 103: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin AFM analizi

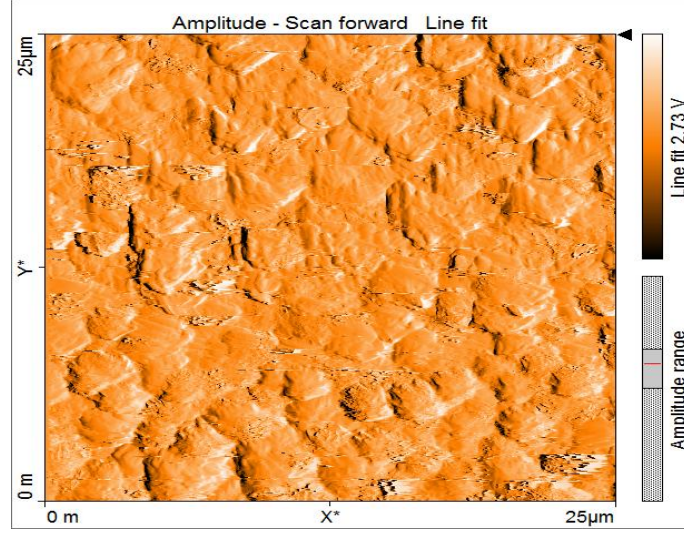
Şekil 4.104-105-106’de cam/ITO/CIS/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS üzerine büyütülen coronene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=172,81 nm, en düşük derinlik değeri=-667,8 nm, en yüksek tepe değeri=1604,5 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 104: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



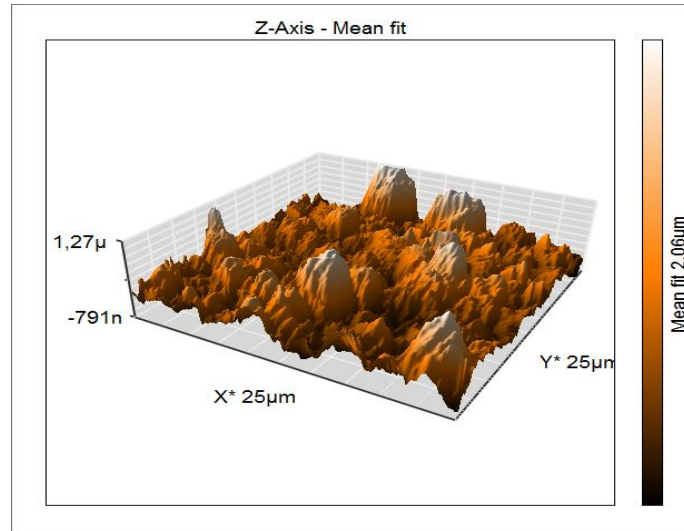
Şekil 4. 105: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



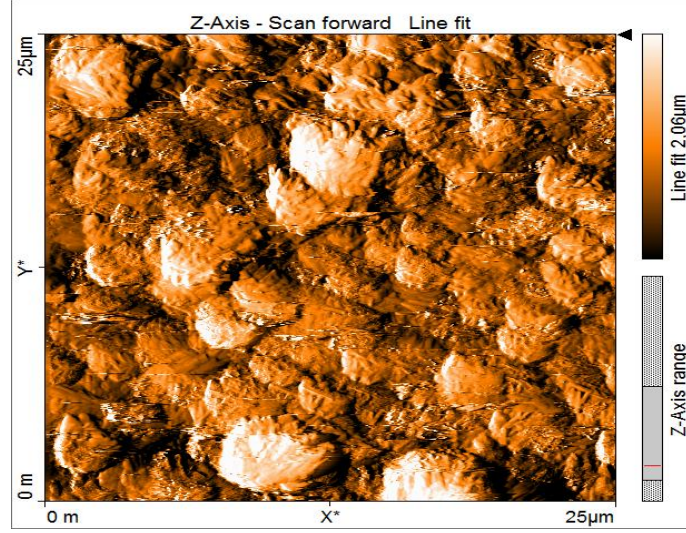
Şekil 4. 106: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin AFM analizi

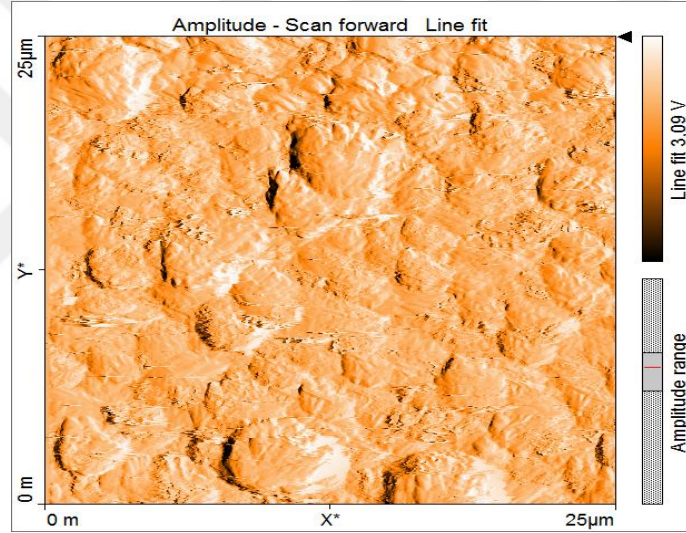
Şekil 4.107-108-109’da cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=248,97 nm, en düşük derinlik değeri=-1047,8 nm, en yüksek tepe değeri=1409,7 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 107: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



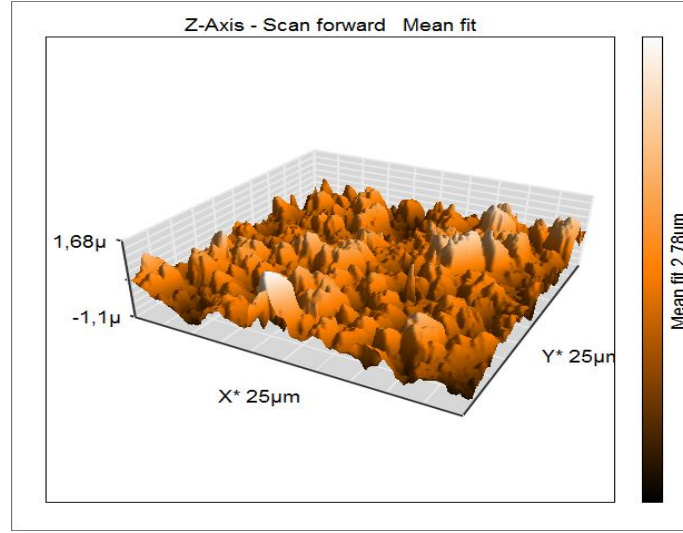
Şekil 4. 108: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



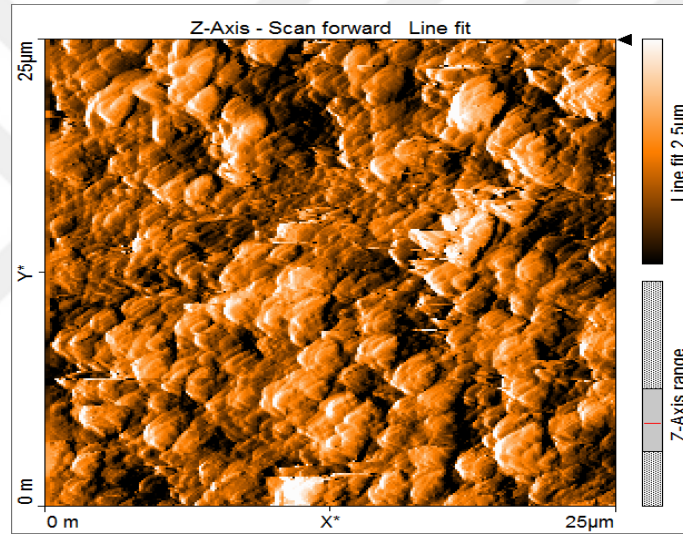
Şekil 4. 109: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.13 Cam/ITO/CIGS ince filminin AFM analizi

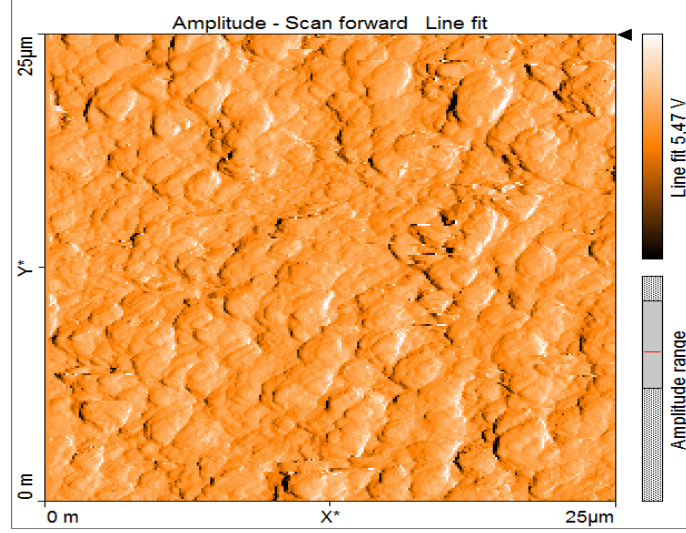
Şekil 4.110-11-112’de cam/ITO/CIGS ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO üzerine büyütülen CIGS ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=282,12 nm, en düşük derinlik değeri=-1282,7 nm, en yüksek tepe değeri=1679,5 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 110: Cam/ITO/CIGS ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



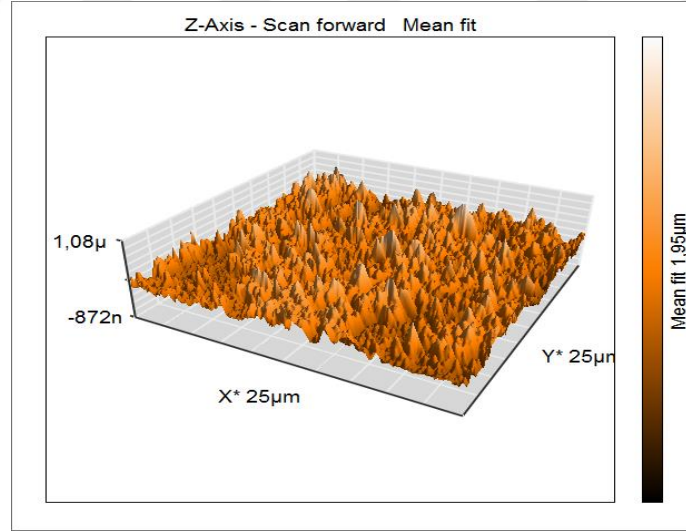
Şekil 4. 111: Cam/ITO/CIGS ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



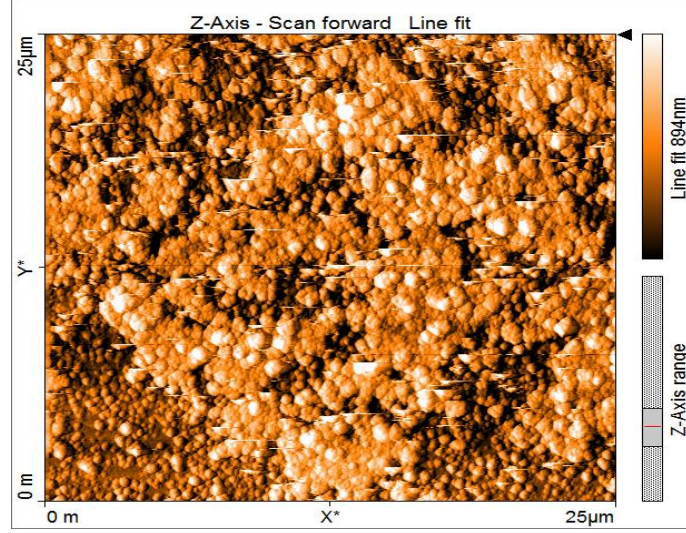
Şekil 4. 112: Cam/ITO/CIGS ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin AFM analizi

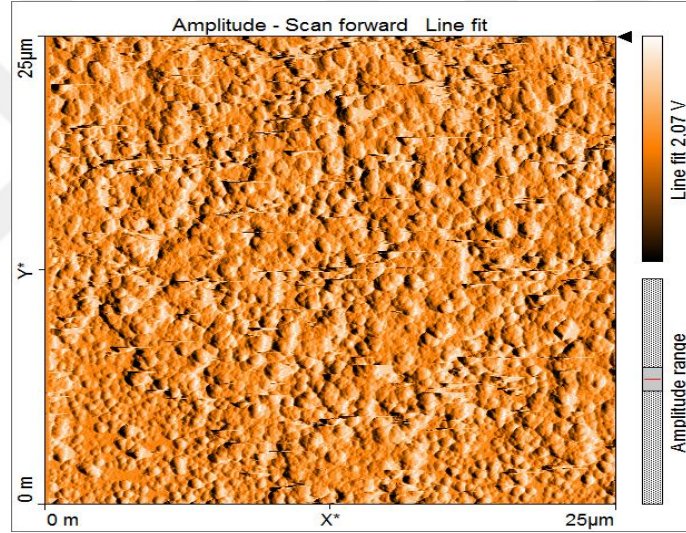
Şekil 4.113-114-115'te cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan CIGS ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=128,52 nm, en düşük derinlik değeri=-443,26 nm, en yüksek tepe değeri=916,79 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 113: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



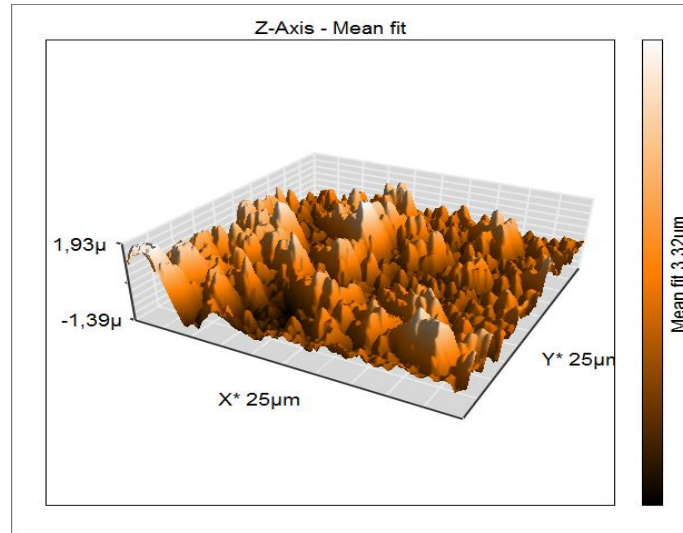
Şekil 4. 114: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



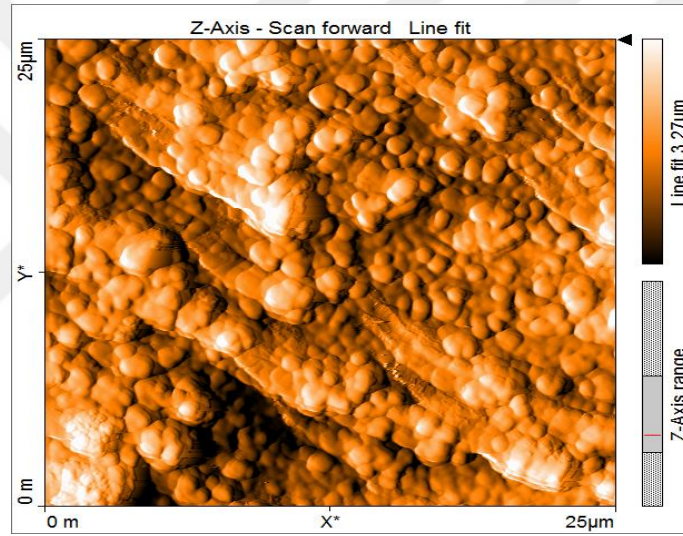
Şekil 4. 115: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin AFM analizi

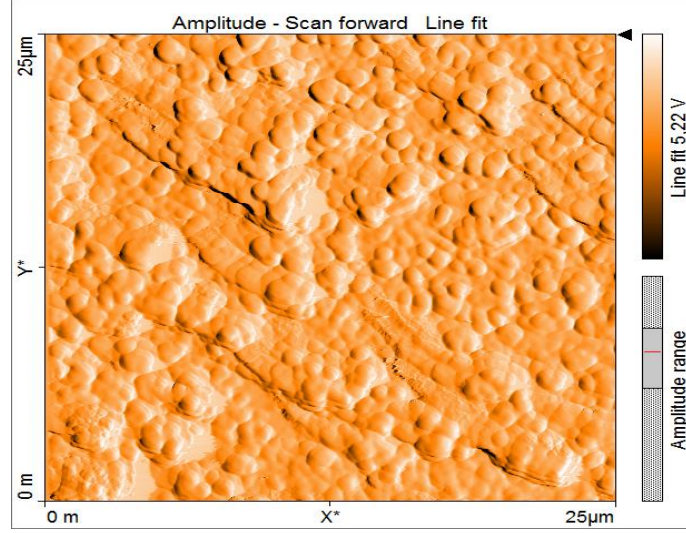
Şekil 4.116-117-118’de cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen Rubrene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=411,05 nm, en düşük derinlik değeri=-1400,7 nm, en yüksek tepe değeri=1936,3 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 116: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



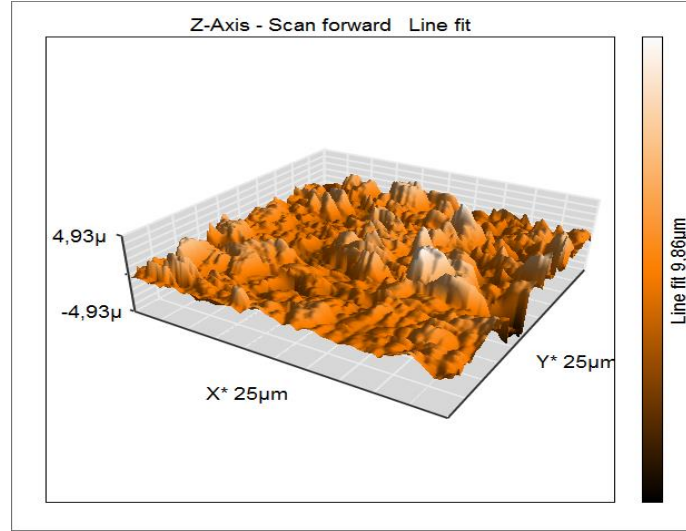
Şekil 4. 117: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



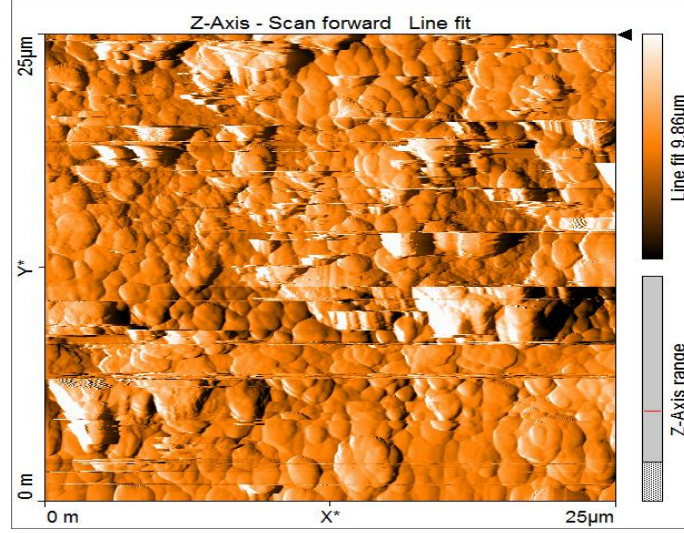
Şekil 4. 118: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin AFM analizi

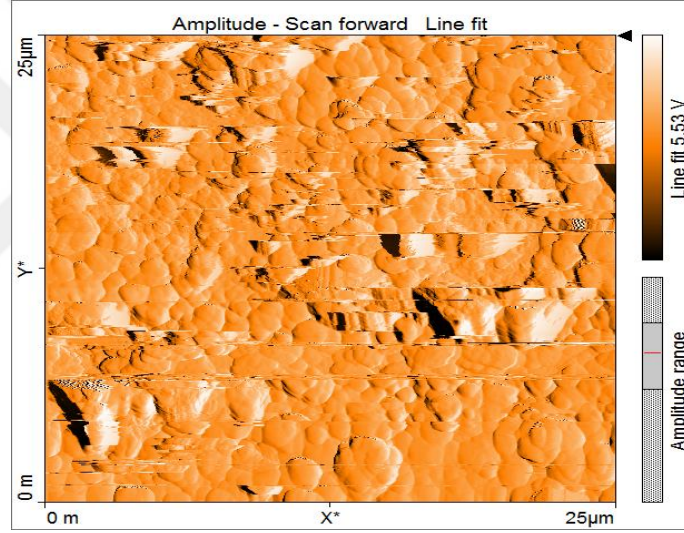
Şekil 4.119-120-121’de cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen Rubrene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=703,44 nm, en düşük derinlik değeri=-4930 nm, en yüksek tepe değeri=4930 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 119: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



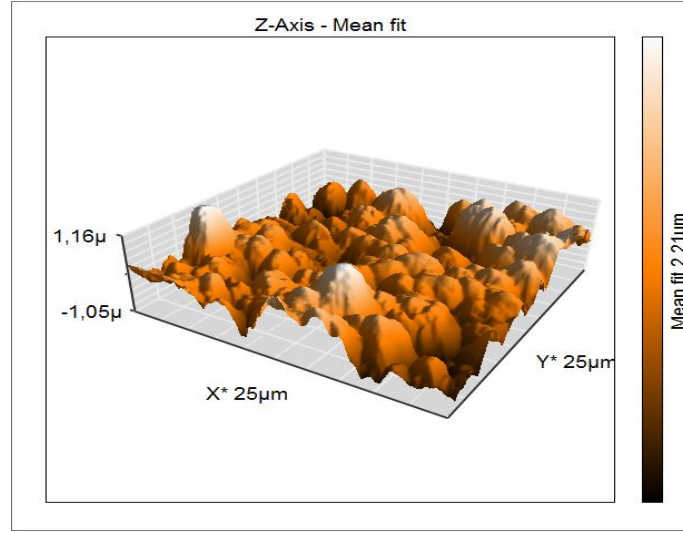
Şekil 4. 120: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



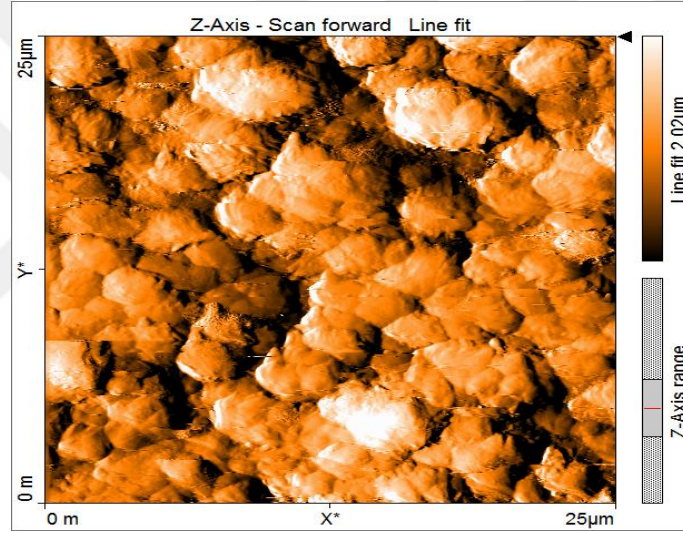
Şekil 4. 121: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin AFM analizi

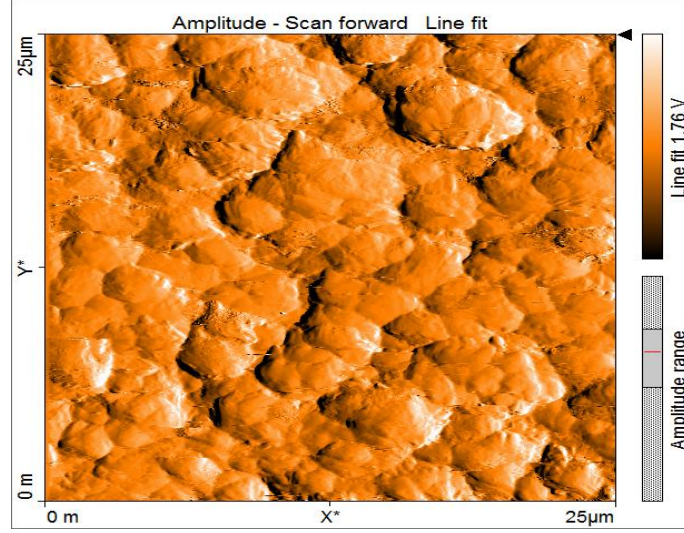
Şekil 4.122-123-124'te cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen Coronene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=254,81 nm, en düşük derinlik değeri=-1033,3 nm, en yüksek tepe değeri=1214,1 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 122: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



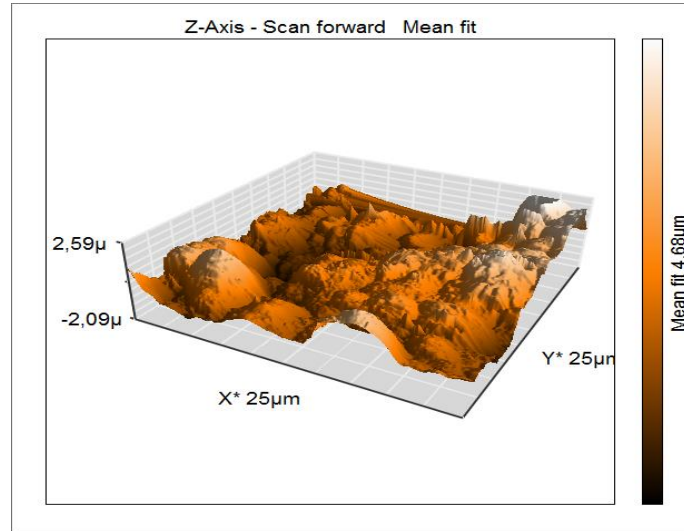
Şekil 4. 123: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.



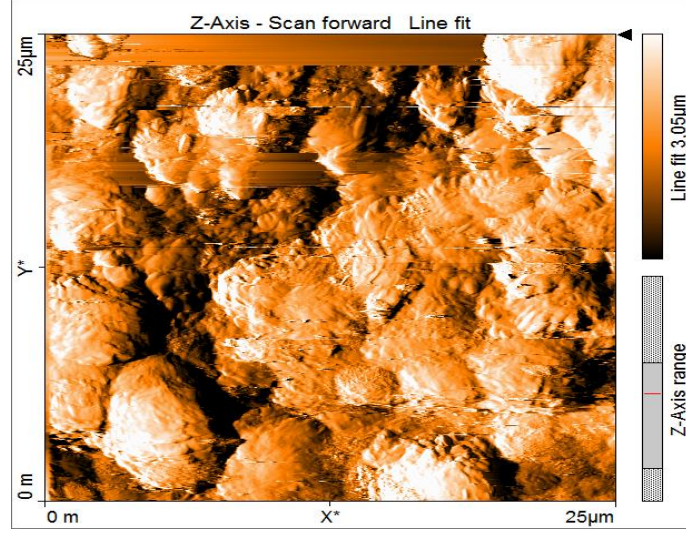
Şekil 4. 124: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

4.2.4.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin AFM analizi

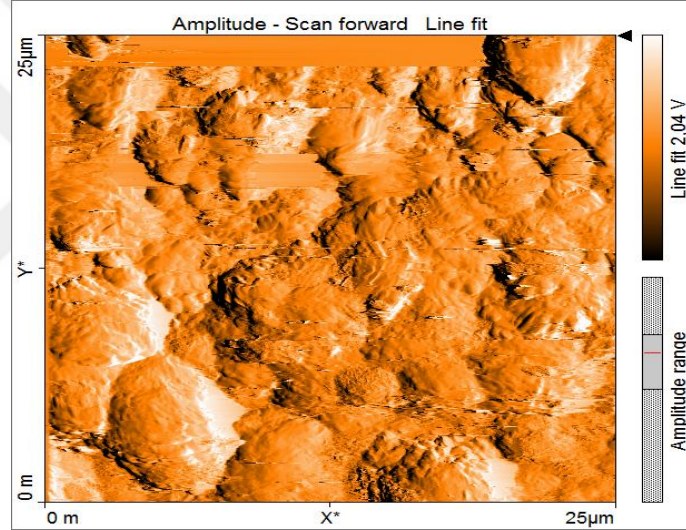
Şekil 4.125-126-127’de cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin iki ve üç boyutta AFM görüntüleri verilmiştir. Cam/ITO/CIGS üzerine büyütülen Coronene ince filminin 25x25 μm tarama alanında ortalama pürüzlülük değeri=451,52 nm, en düşük derinlik değeri=-1616,2 nm, en yüksek tepe değeri=1776,8 nm olarak belirlendi.



Şekil 4. 125: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Z-Axis-Mean fit AFM görüntüsü.



Şekil 4. 126: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Z-axis-Scan forward AFM görüntüsü.

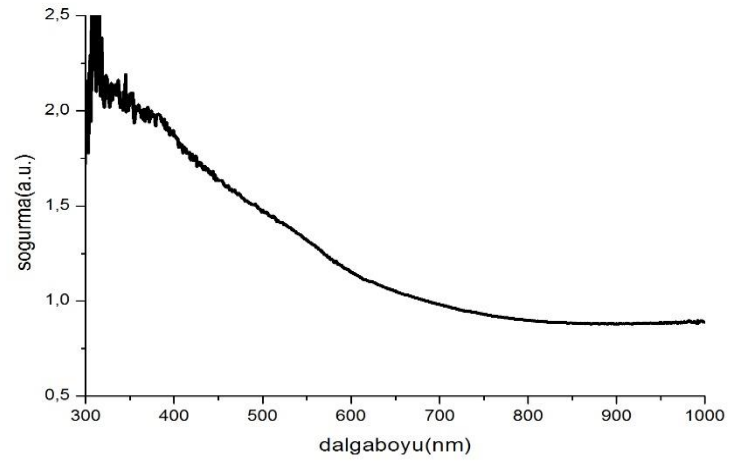


Şekil 4. 127: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin Amplitude-Scan forward AFM görüntüsü.

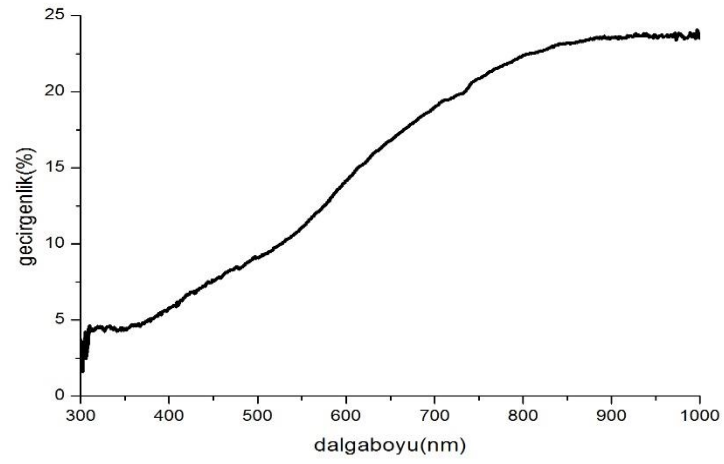
4.3 Optiksel Özellikler

4.3.1 Cam/ITO/InSe ince filminin optiksel özellikleri

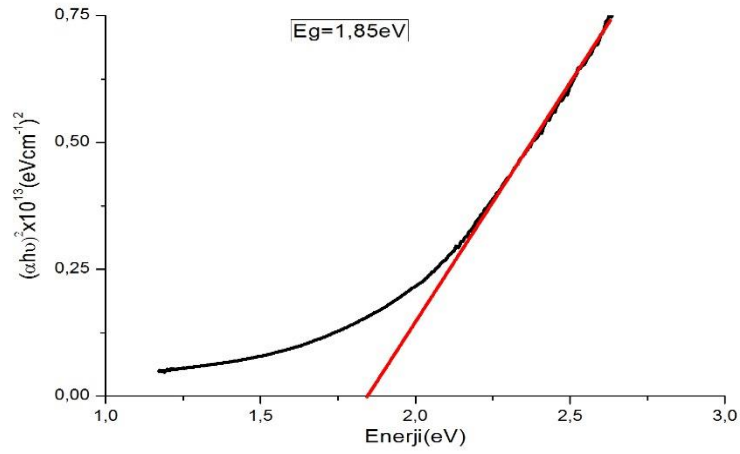
Şekil 4.128-129-130'da cam/ITO üzerine büyütülen InSe ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe filminin 700 nm de optik geçirgenliği %19,07, 400 nm de optik geçirgenliği %5,89, yasak enerji aralığının değeri ise 1,85 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 128: Cam/ITO/InSe ince filminin optik soğurma grafiği.



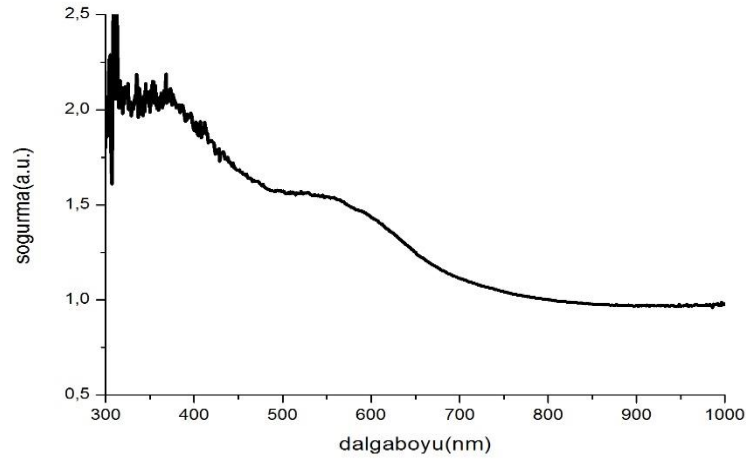
Şekil 4. 129: Cam/ITO/InSe ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



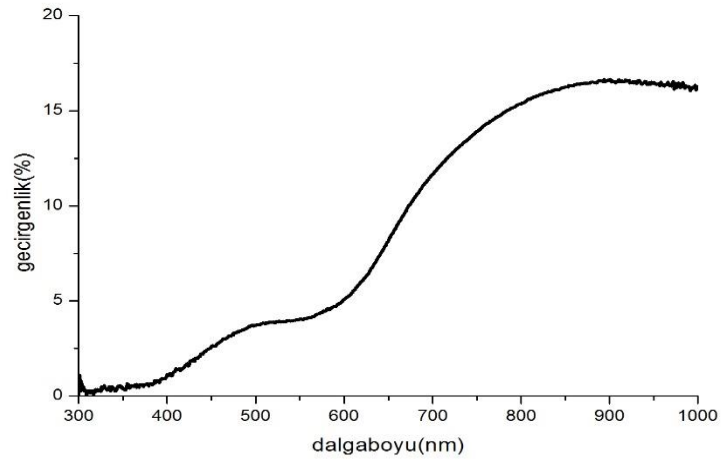
Şekil 4. 130: Cam/ITO/InSe ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.2 Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optiksel özellikleri

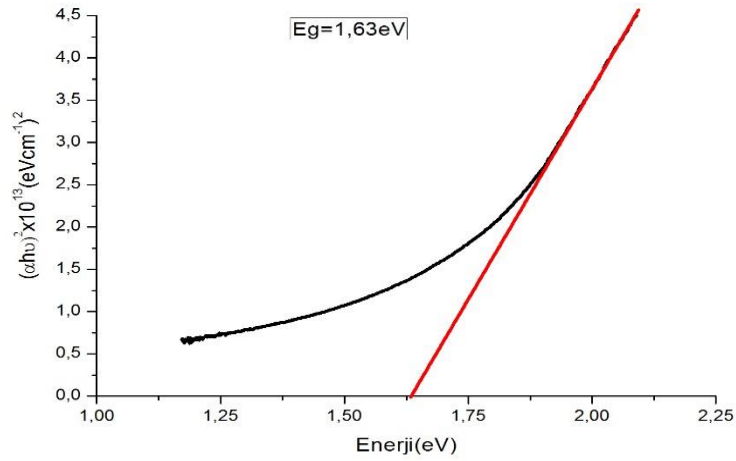
Şekil 4.131-132-133'te Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan InSe ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe(tav) filminin 700 nm de optik geçirgenliği %11,65, 400 nm de optik geçirgenliği %1,12, yasak enerji aralığının değeri ise 1,63 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 131: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.



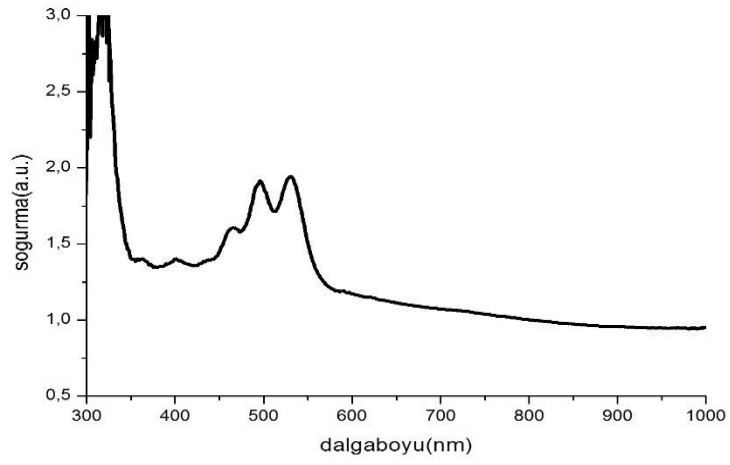
Şekil 4. 132: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



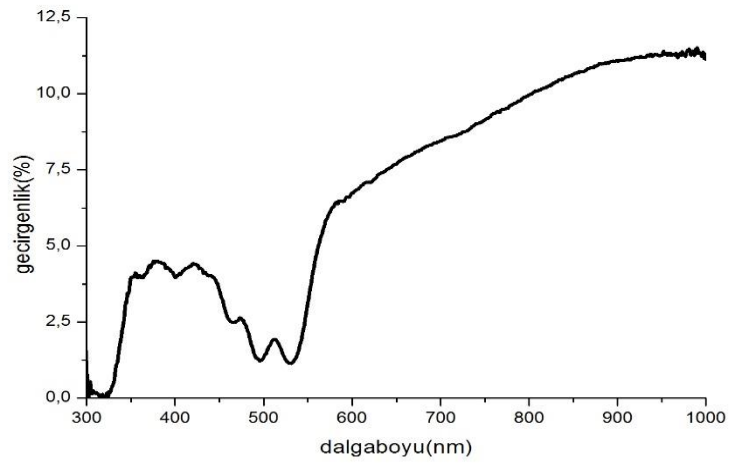
Şekil 4. 133: Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.3 Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

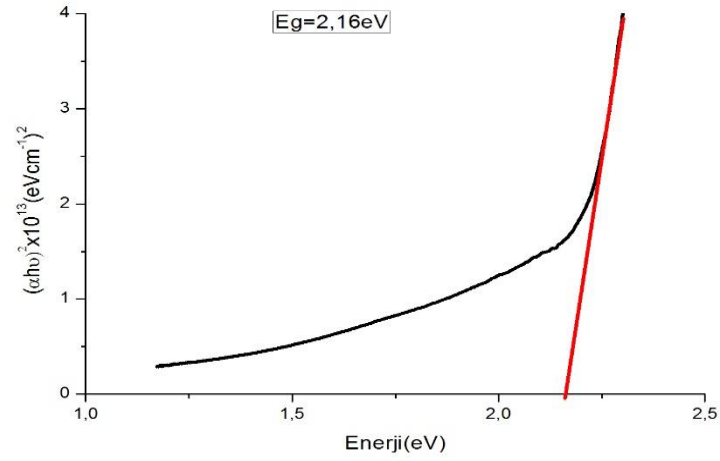
Şekil 4.134-135-136’da Cam/ITO/InSe üzerine büyütülen rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe/rubrene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %8,44, 400 nm de optik geçirgenliği %3,96, yasak enerji aralığının değeri ise 2,16 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 134: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



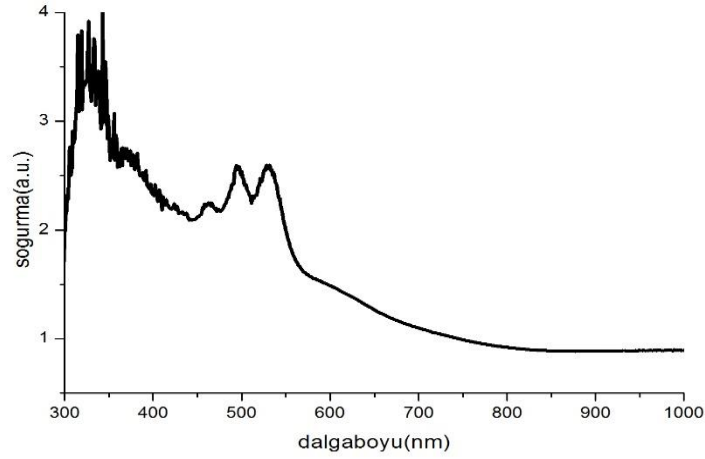
Şekil 4. 135: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



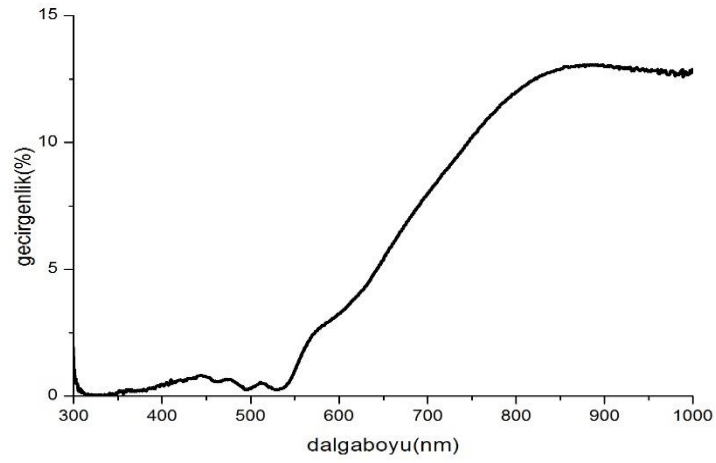
Şekil 4. 136: Cam/ITO/InSe/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.4 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

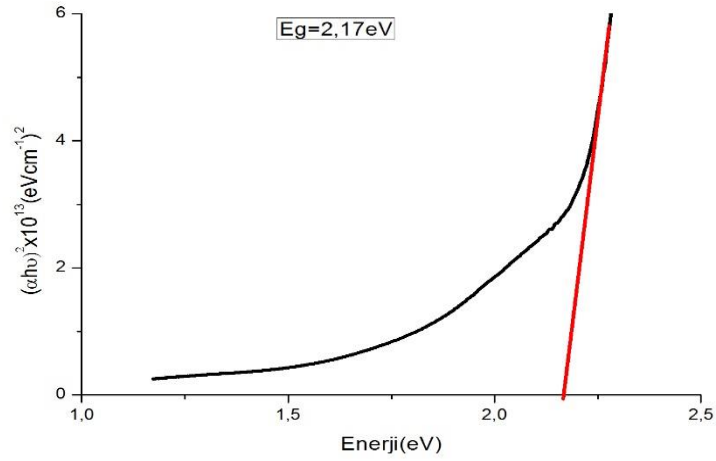
Şekil 137-138-139’da Cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %7,96, 400 nm de optik geçirgenliği %0,42, yasak enerji aralığının değeri ise 2,17 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 137: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



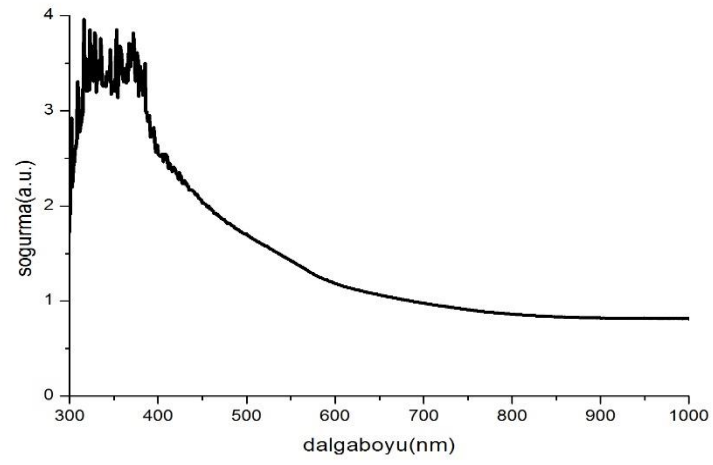
Şekil 4. 138: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



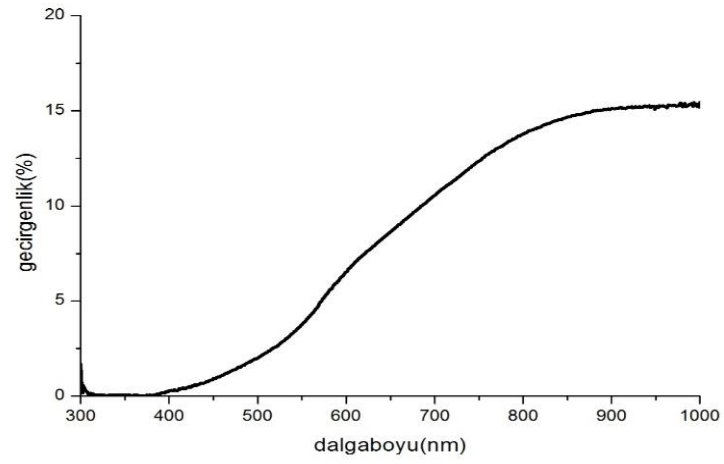
Şekil 4. 139: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.5 Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optiksel özellikleri

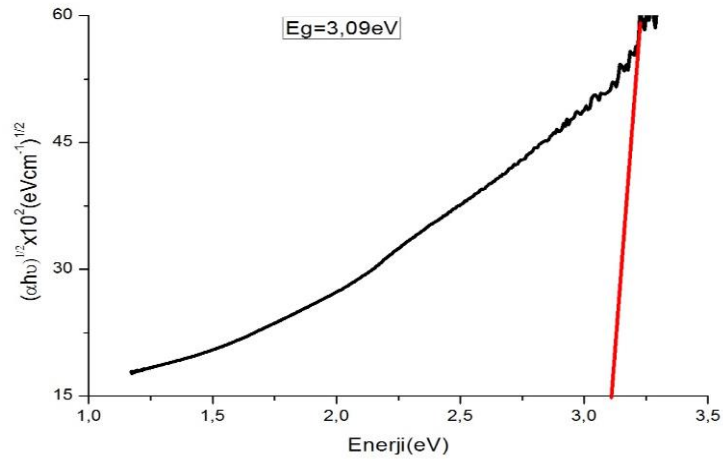
Şekil 140-141-142’de cam/ITO/InSe üzerine büyütülen coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %10,54, 400 nm de optik geçirgenliği %0,23, yasak enerji aralığının değeri ise 3,09 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 140: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



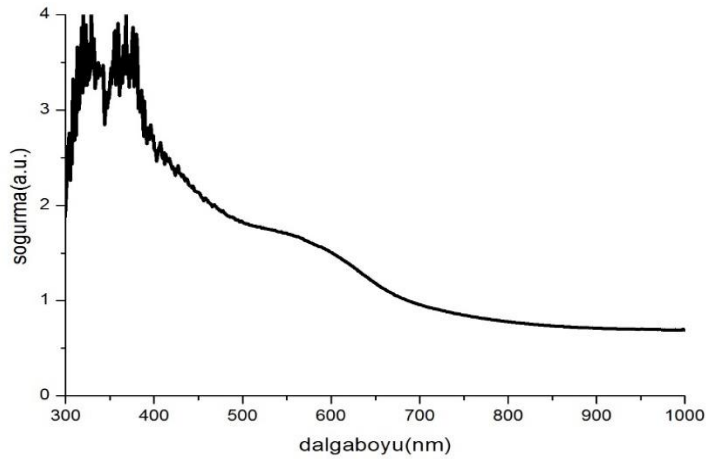
Şekil 4. 141: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



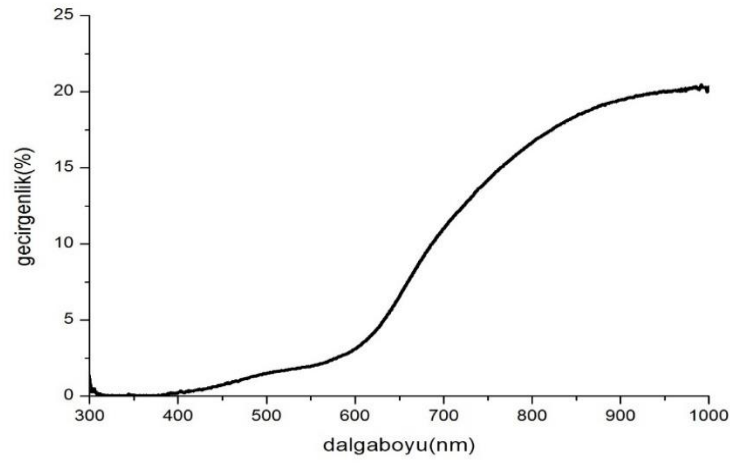
Şekil 4. 142: Cam/ITO/InSe/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.6 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri

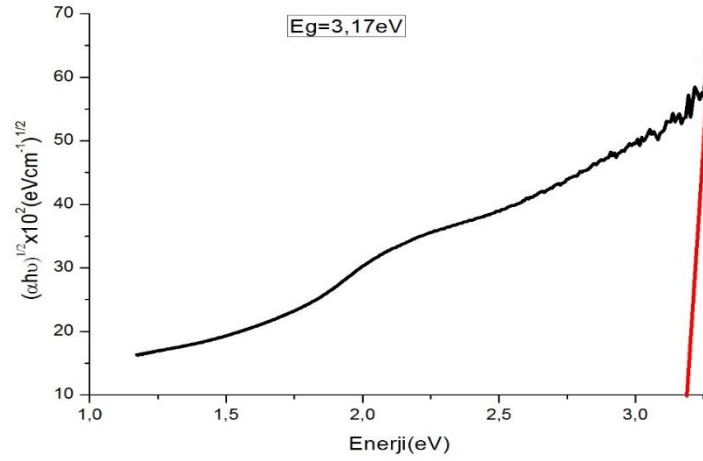
Şekil 4.143-144-145'te cam/ITO/InSe(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/InSe(tav)/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %10,99, 400 nm de optik geçirgenliği %0,19, yasak enerji aralığının değeri ise 3,17 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 143: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



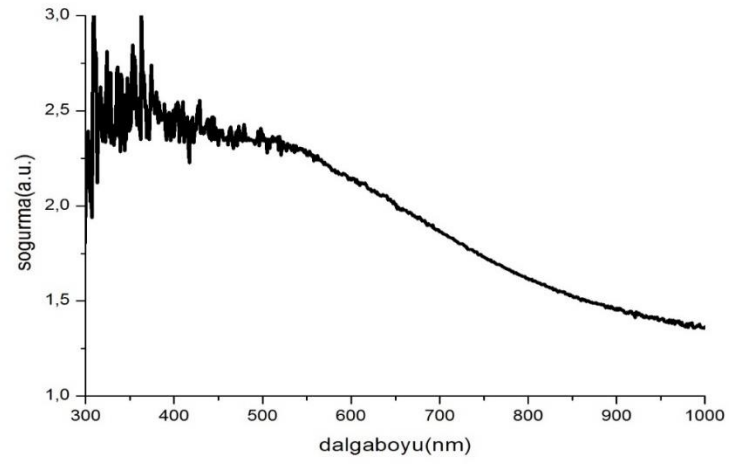
Şekil 4. 144: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



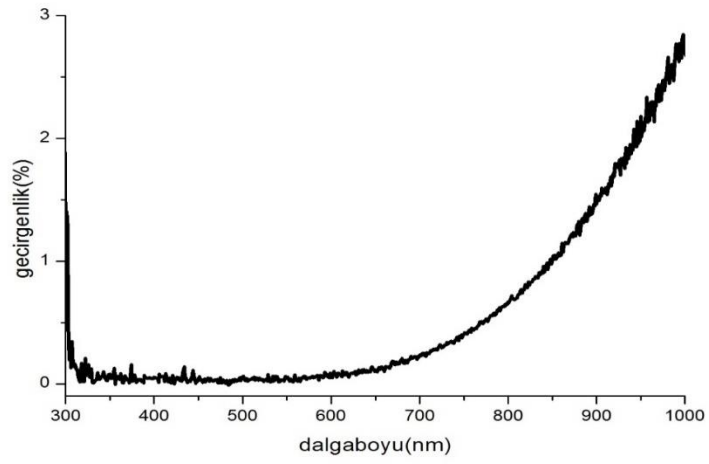
Şekil 4. 145: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.7 Cam/ITO/CIS ince filminin optiksel özellikleri

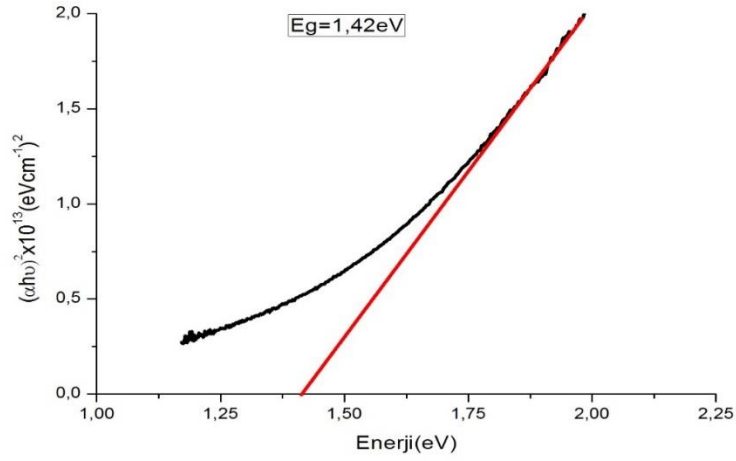
Şekil 4.146-147-148’de Cam/ITO üzerine büyütülen CIS ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS filminin 700 nm de optik geçirgenliği %0,22, 400 nm de optik geçirgenliği %0,07, yasak enerji aralığının değeri ise 1,42 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 146: Cam/ITO/CIS ince filminin optik soğurma grafiği.



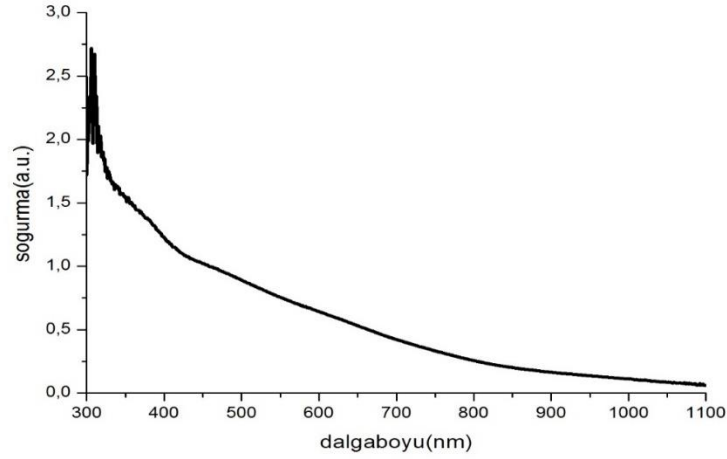
Şekil 4. 147: Cam/ITO/CIS ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



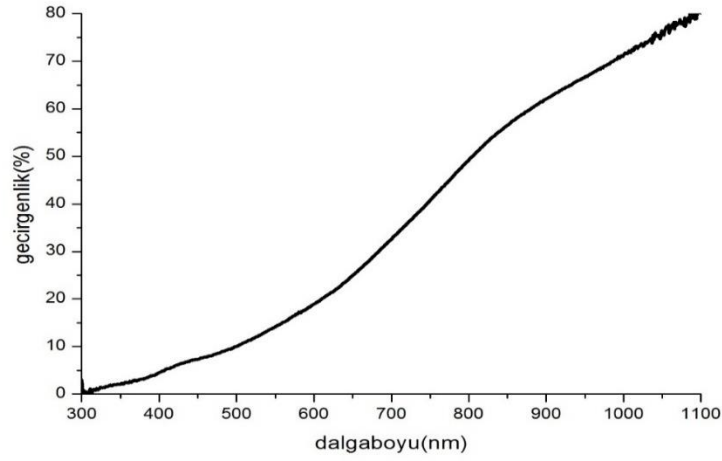
Şekil 4. 148: Cam/ITO/CIS ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.8 Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optiksel özellikleri

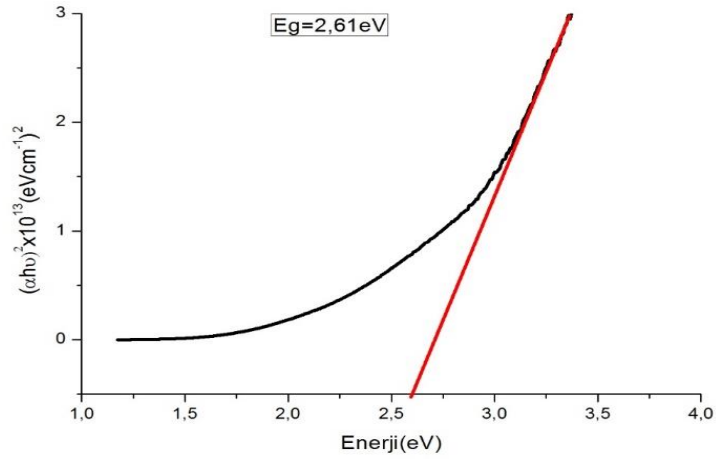
Şekil 4.149-150-151’de Cam/ITO üzerine büyütülen ve tavlanan CIS ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav) filminin 700 nm de optik geçirgenliği %32,26, 400 nm de optik geçirgenliği %4,47, yasak enerji aralığının değeri ise 2,61 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 149: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.



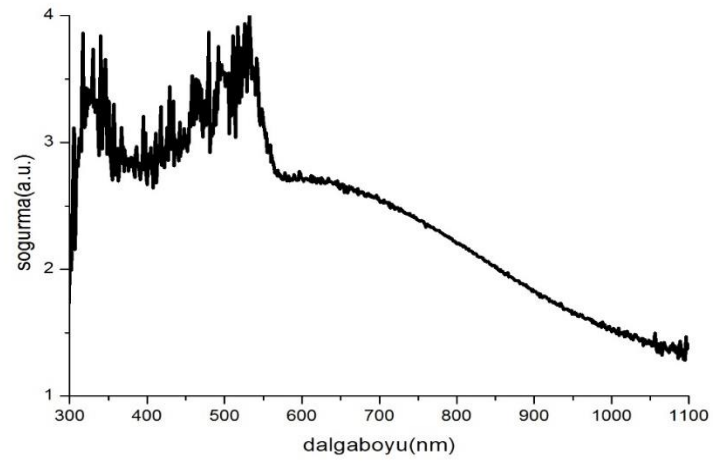
Şekil 4. 150: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



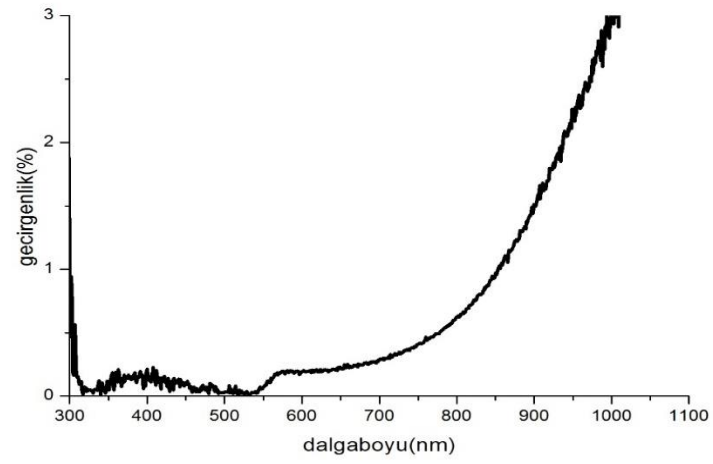
Şekil 4. 151: Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.9 Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

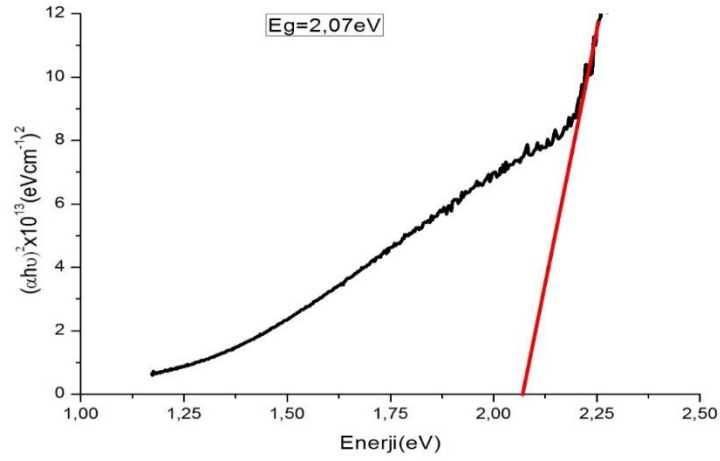
Şekil 4.152-153-154'te cam/ITO/CIS üzerine büyütülen rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS/rubrene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %0,29, 400 nm de optik geçirgenliği %0,16, yasak enerji aralığının değeri ise 2,07 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 152: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



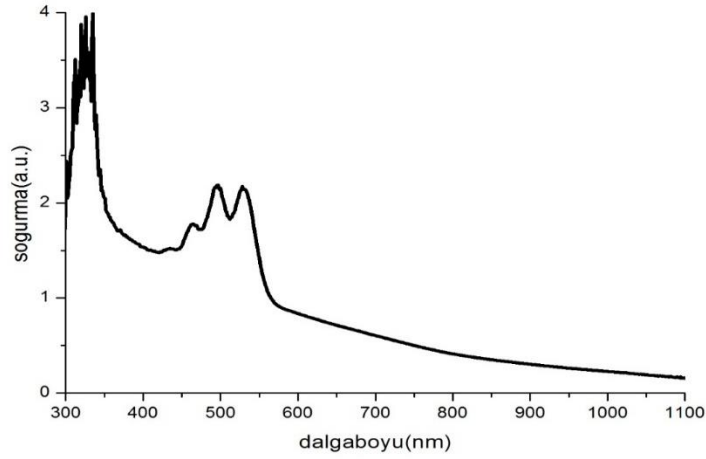
Şekil 4. 153: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



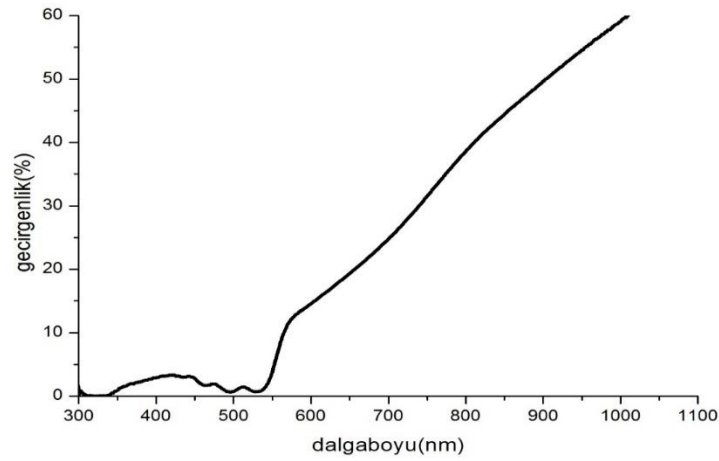
Şekil 4. 154: Cam/ITO/CIS/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.10 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

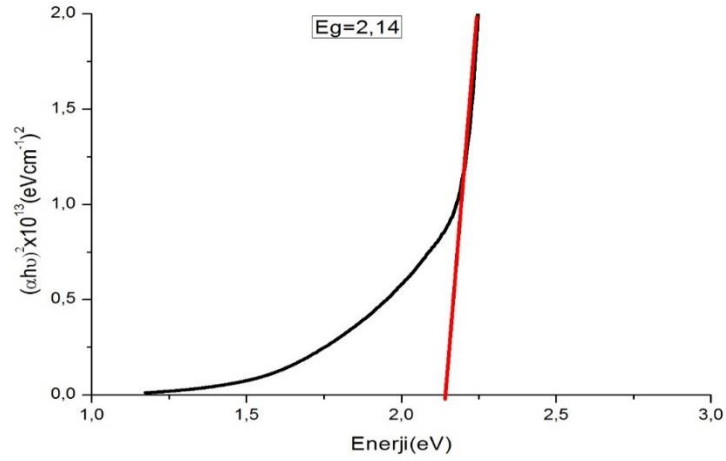
Şekil 4.155-156-157’de cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %24,77, 400 nm de optik geçirgenliği %2,91, yasak enerji aralığının değeri ise 2,14 eV olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 155: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



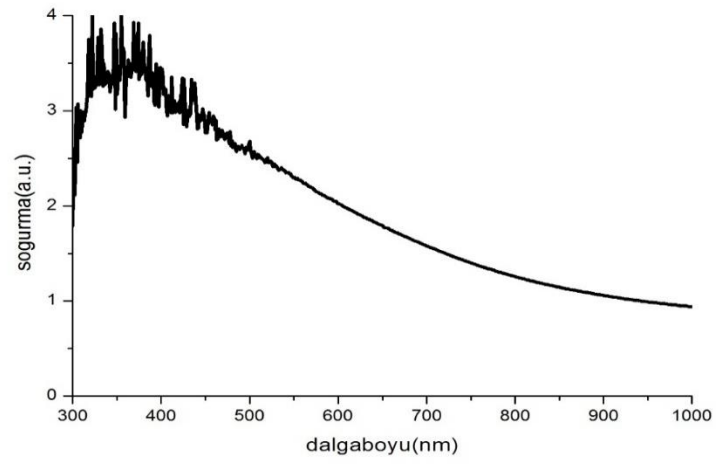
Şekil 4. 156: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



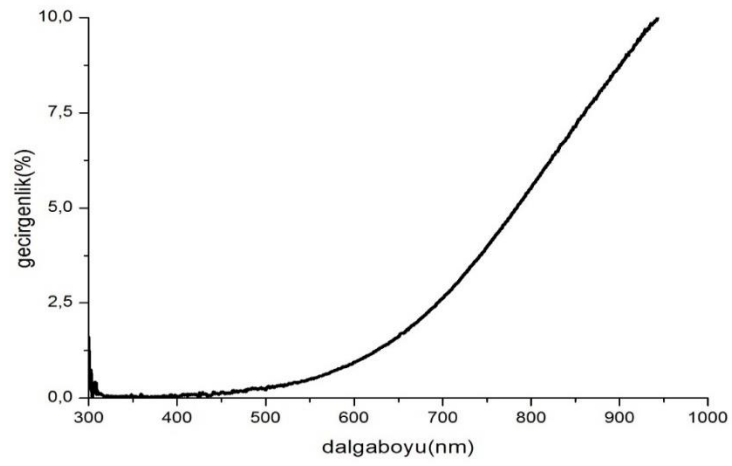
Şekil 4. 157: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.11 Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optiksel özellikleri

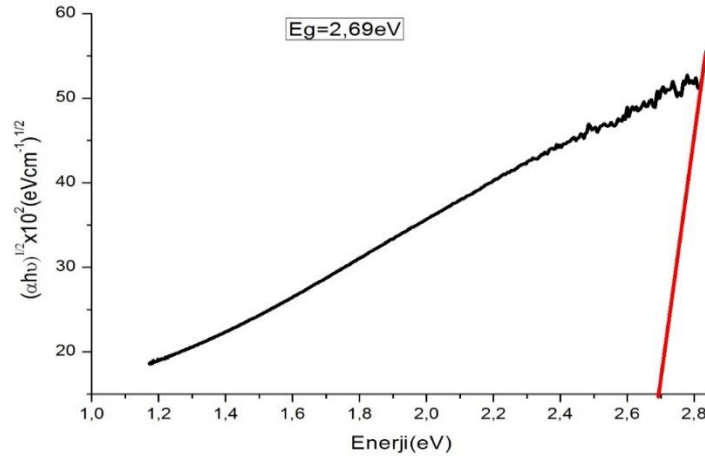
Şekil 4.158-159-160'da cam/ITO/CIS üzerine büyütülen coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %2,63, 400 nm de optik geçirgenliği %0,57, yasak enerji aralığının değeri ise 2,69 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 158: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



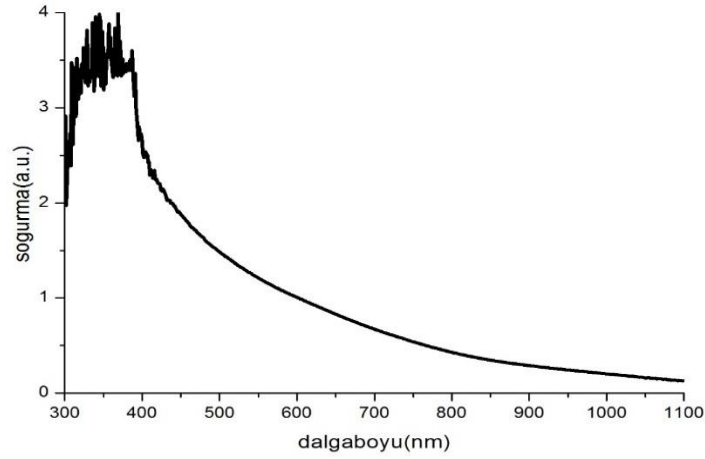
Şekil 4. 159: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



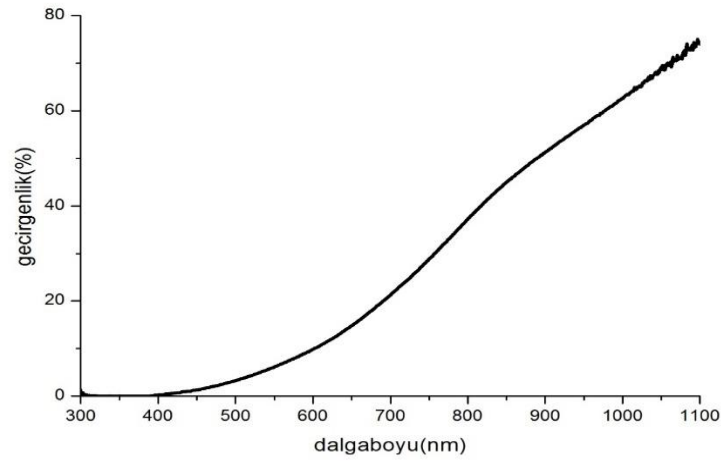
Şekil 4. 160: Cam/ITO/CIS/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.12 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri

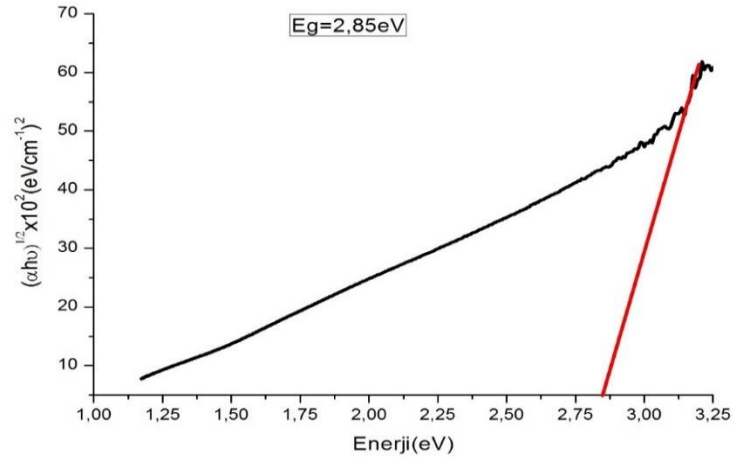
Şekil 4.161-162-163'te cam/ITO/CIS(tav) üzerine büyütülen coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIS(tav)/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %21,26, 400 nm de optik geçirgenliği %0,22, yasak enerji aralığının değeri ise 2,85 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 161: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



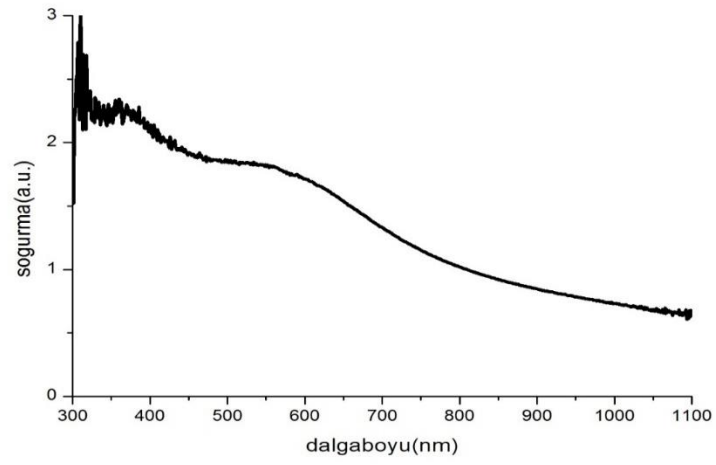
Şekil 4. 162: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



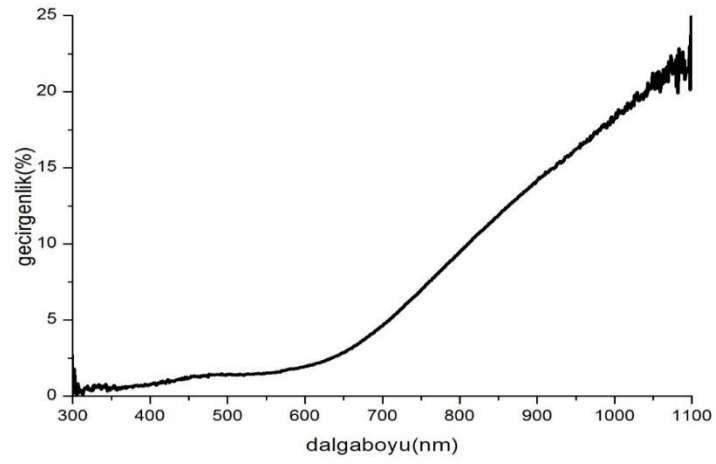
Şekil 4. 163: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.13 Cam/ITO/CIGS İnce Filminin Optiksel Özellikleri

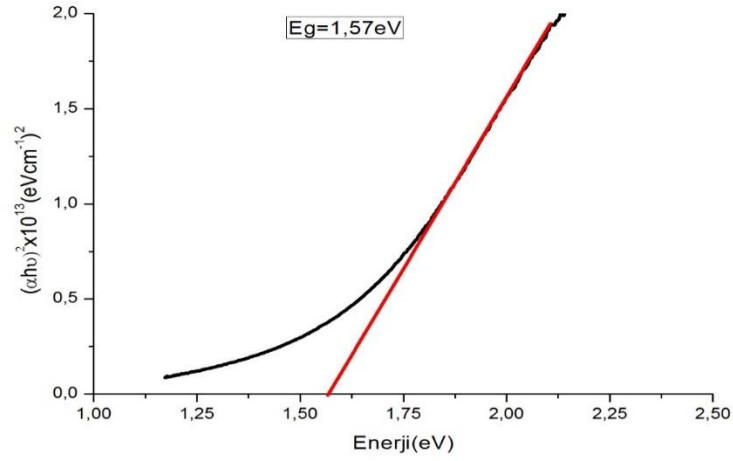
Şekil 4.164-165-166’da cam/ITO/CIGS ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIGS filminin 700 nm de optik geçirgenliği %4,61, 400 nm de optik geçirgenliği %0,75, yasak enerji aralığının değeri ise 1,57 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 164: Cam/ITO/CIGS ince filminin optik soğurma grafiği.



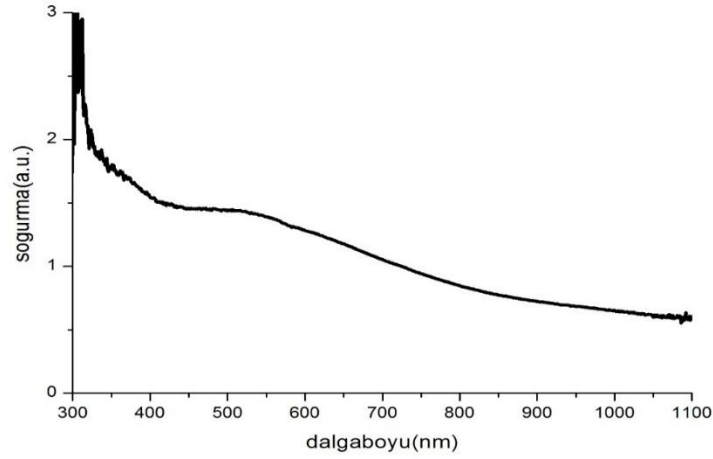
Şekil 4. 165: Cam/ITO/CIGS ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



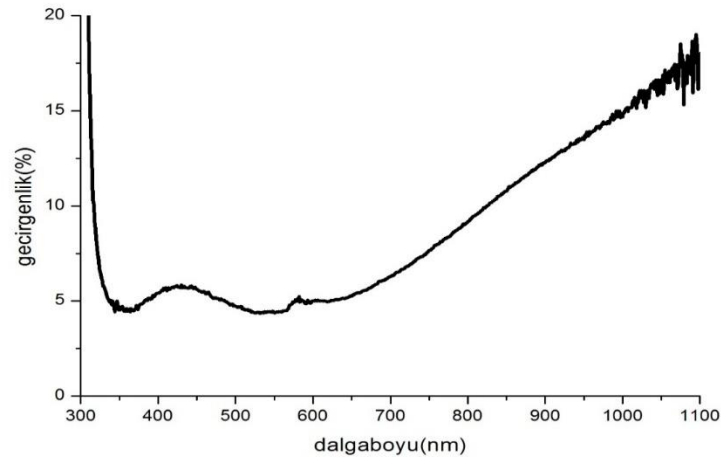
Şekil 4. 166: Cam/ITO/CIGS ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.14 Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optiksel özellikleri

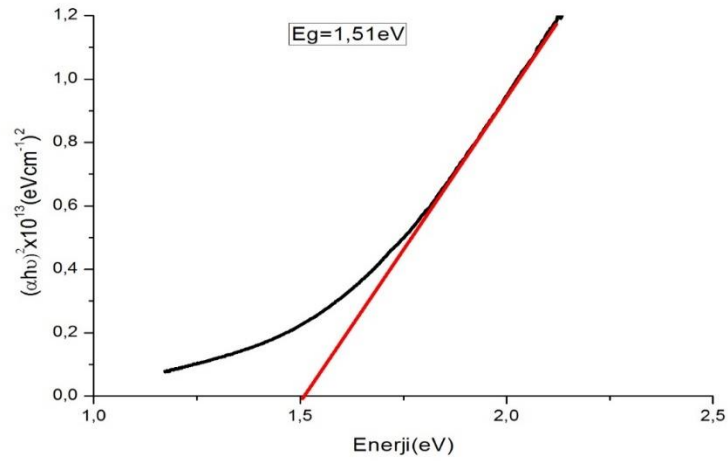
Şekil 4.167-168-169’da cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIGS(tav) filminin 700 nm de optik geçirgenliği %6,28, 400 nm de optik geçirgenliği %5,39, yasak enerji aralığının değeri ise 1,51 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 167: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optik soğurma grafiği.



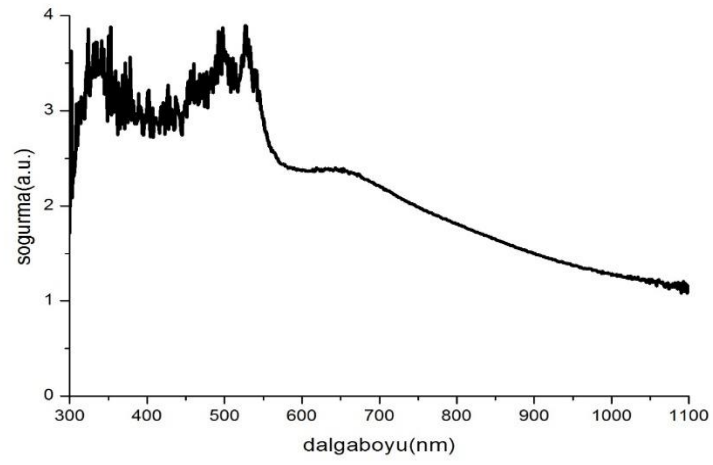
Şekil 4. 168: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin optik geçirmenlik grafiğı.



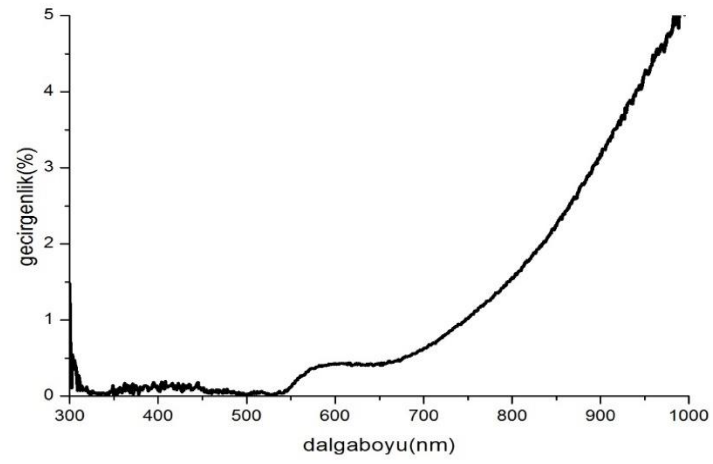
Şekil 4. 169: Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin yasak enerji grafiğı.

4.3.15 Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

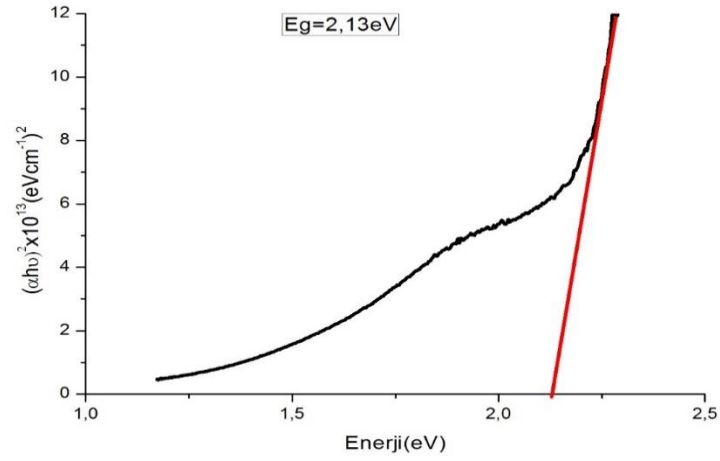
Şekil 4.170-171-172’de cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiğı, optik geçirmenlik grafiğı ve yasak enerji grafiğı verilmiştir. Cam/ITO/CIGS/rubrene filminin 700 nm de optik geçirmenliğı %0,61, 400 nm de optik geçirmenliğı %0,07, yasak enerji aralığının değeri ise 2,13 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 170: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



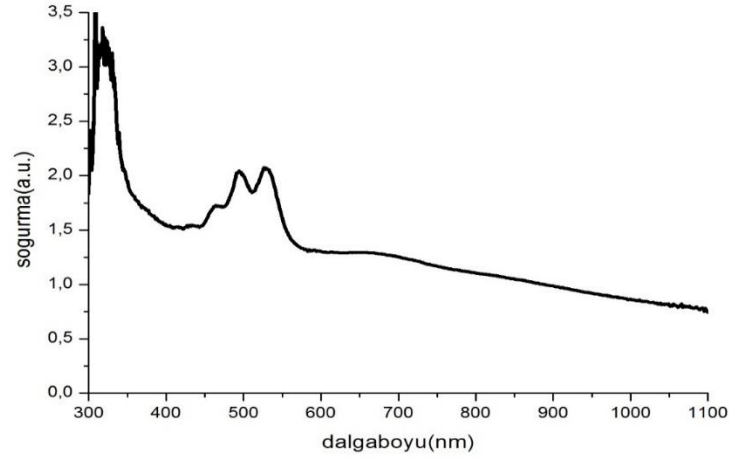
Şekil 4. 171: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



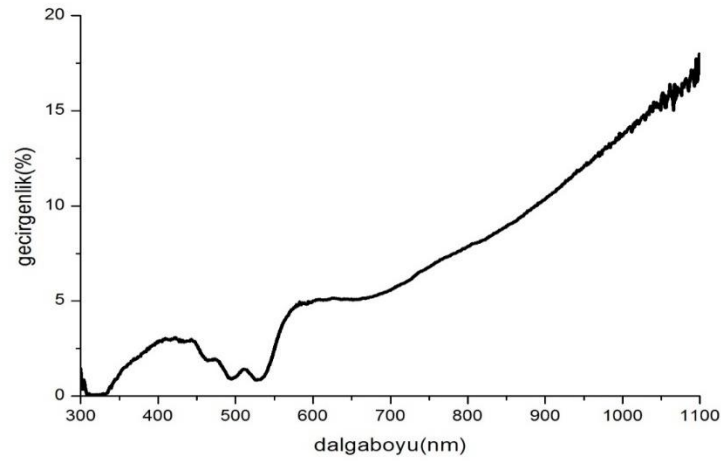
Şekil 4. 172: Cam/ITO/CIGS/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.16 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optiksel özellikleri

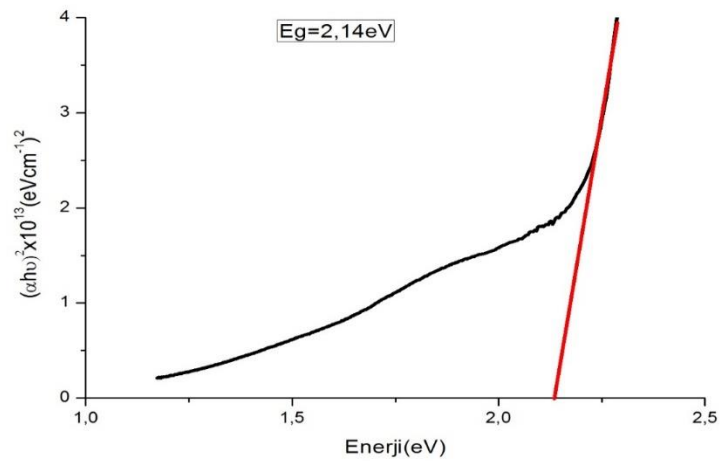
Şekil 4.173-174-175'te Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %5,59, 400 nm de optik geçirgenliği %2,91, yasak enerji aralığının değeri ise 2,14 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 173: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optik soğurma grafiği.



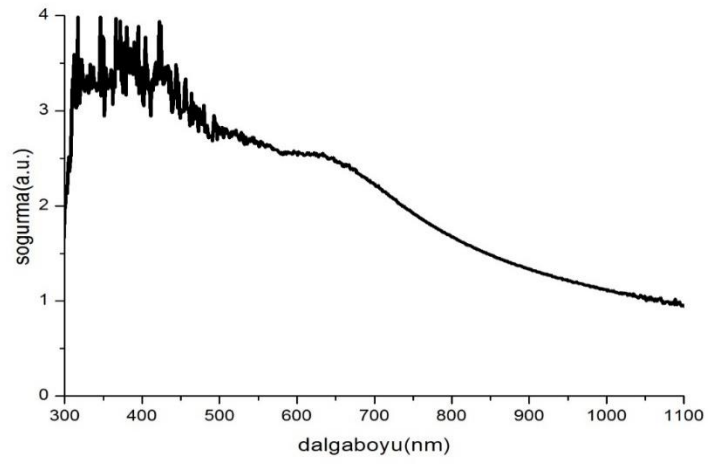
Şekil 4. 174: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



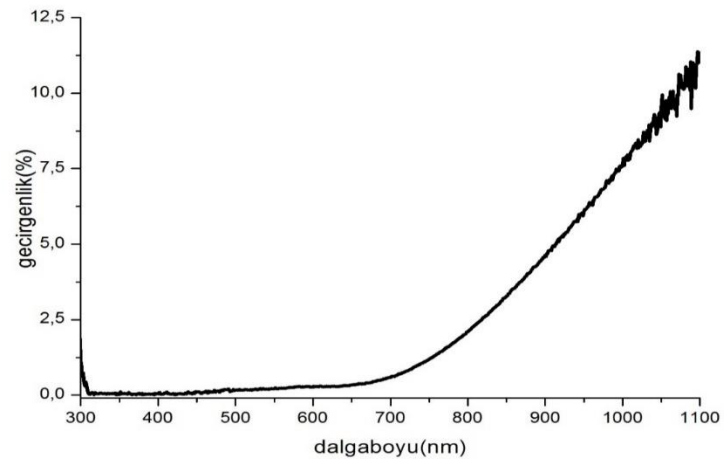
Şekil 4. 175: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.17 Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optiksel özellikleri

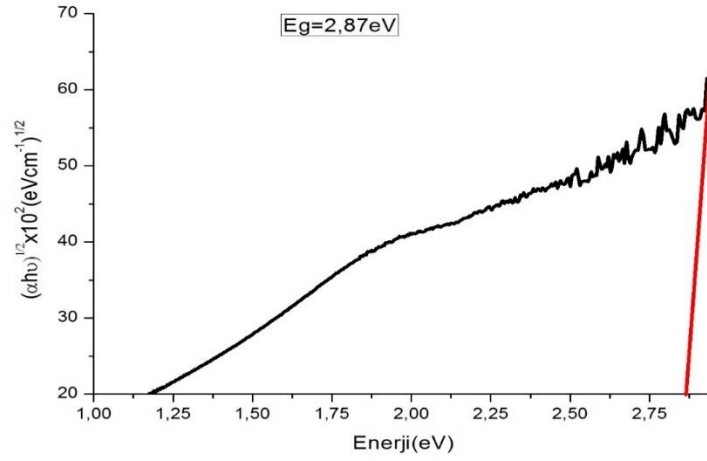
Şekil 4.176-177-178’de cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIGS/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %0,62, 400 nm de optik geçirgenliği %0,06, yasak enerji aralığının değeri ise 2,87 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 176: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



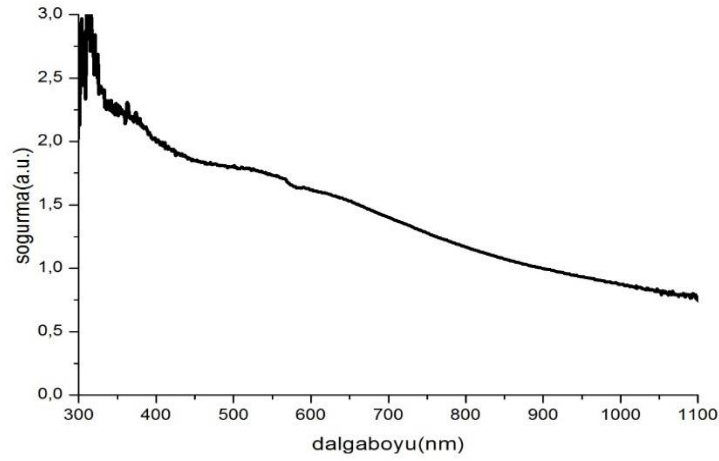
Şekil 4. 177: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



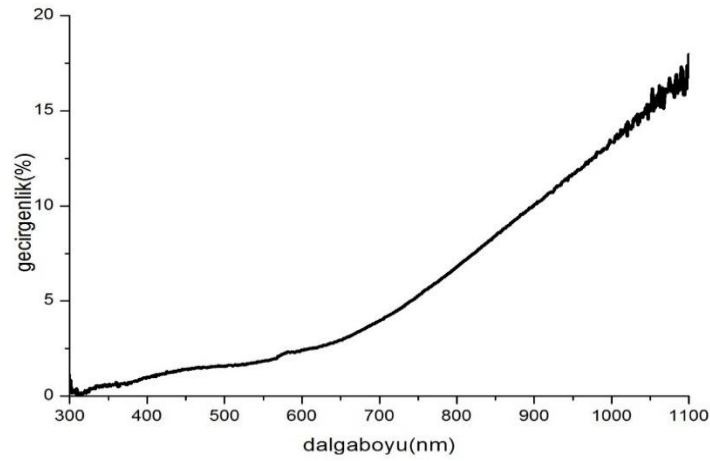
Şekil 4. 178: Cam/ITO/CIGS/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.3.18 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optiksel özellikleri

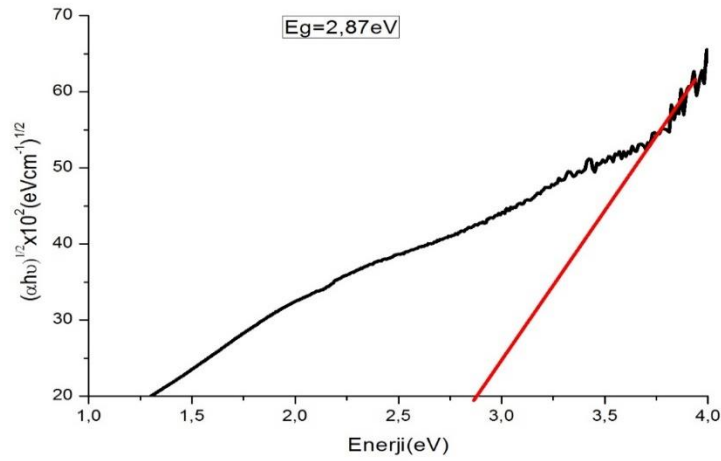
Şekil 4.179-180-181’de cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin sırasıyla optik soğurma grafiği, optik geçirgenlik grafiği ve yasak enerji grafiği verilmiştir. Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene filminin 700 nm de optik geçirgenliği %3,99, 400 nm de optik geçirgenliği %0,97, yasak enerji aralığının değeri ise 2,87 eV olarak belirlendi.



Şekil 4. 179: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optik soğurma grafiği.



Şekil 4. 180: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin optik geçirgenlik grafiği.



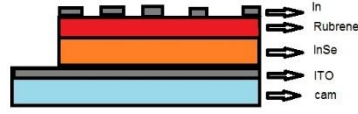
Şekil 4. 181: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene ince filminin yasak enerji grafiği.

4.4 Elektriksel Özellikler

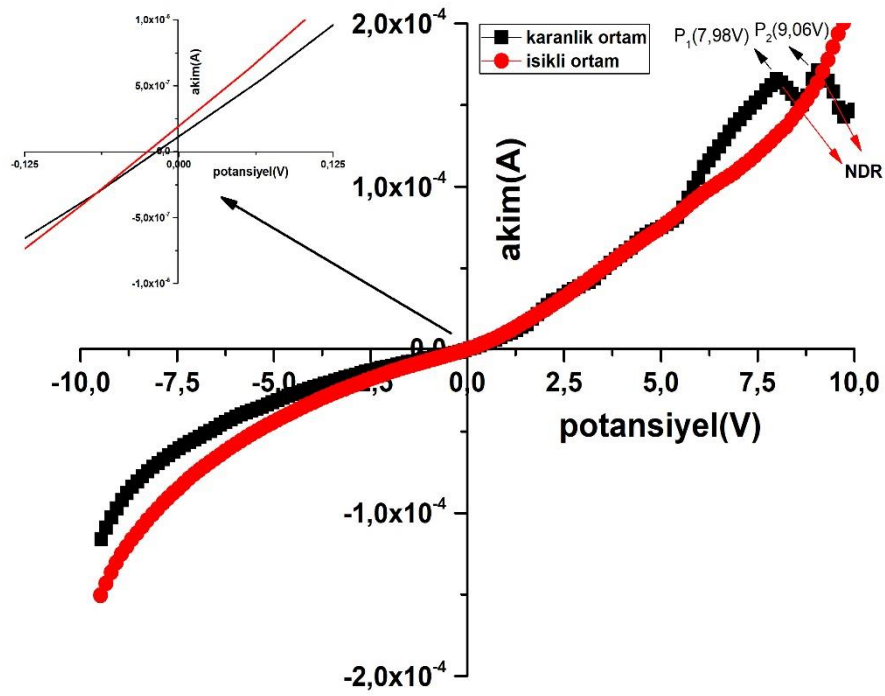
Bu çalışmada diyot idealite faktörü n ve seri direnç R_s değerleri Cheung fonksiyonu kullanılarak belirlenmiştir. İdealite faktörü n ve R_s değerleri oda sıcaklığında (300 °K), karanlık ve 1000 W/m² ışıklı ortamda gerçekleştirilen I-V karakterizasyonlarından hesaplanmıştır.

4.4.1 Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.182’de, I-V karakteristiği şekil 4.183’te ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,184’te gösterilmiştir.

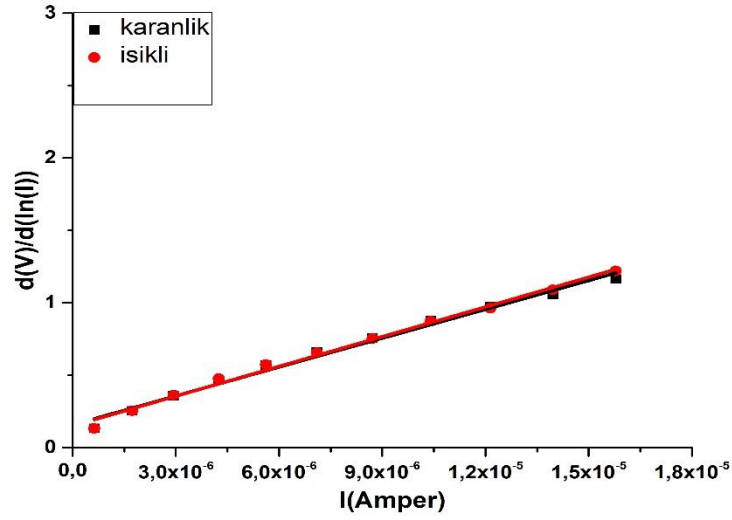


Şekil 4. 182: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 183: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda $0,125 \mu\text{A}$, ışıklı ortamda $0,187 \mu\text{A}$ 'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu ve ışık altında iletkenliğinin arttığı, karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda sırasıyla $7,98 \text{ V}$ ve $9,06 \text{ V}$ değerlerinde 2 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

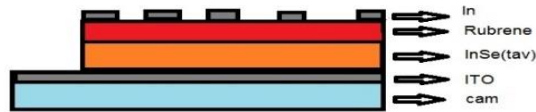


Şekil 4. 184: Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

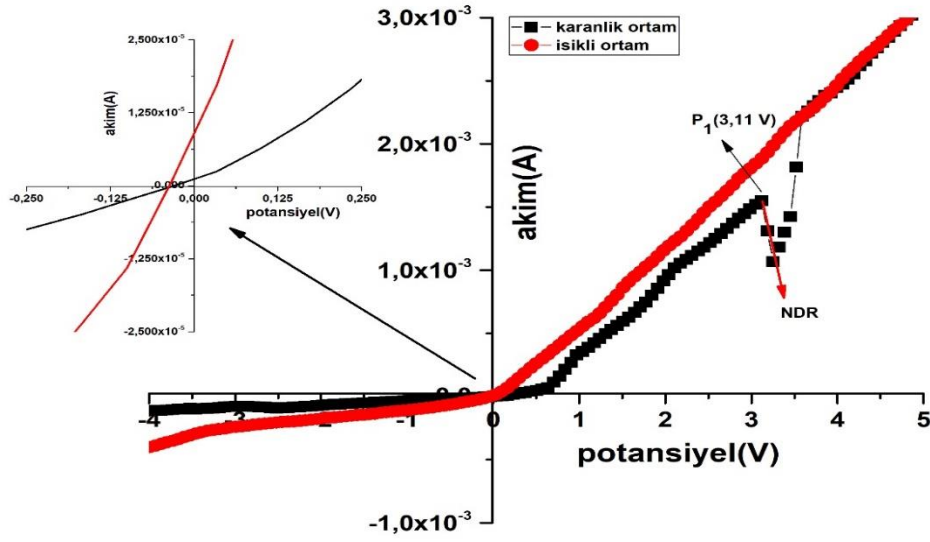
Cam/ITO/InSe/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,159, n idealite faktörü 6,36, R_s değeri 74,8 k Ω olarak ve ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,150, n idealite faktörü 6, R_s değeri 59,2 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.2 Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.185'te, I-V karakteristiği şekil 4.186'da ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,187'de gösterilmiştir.

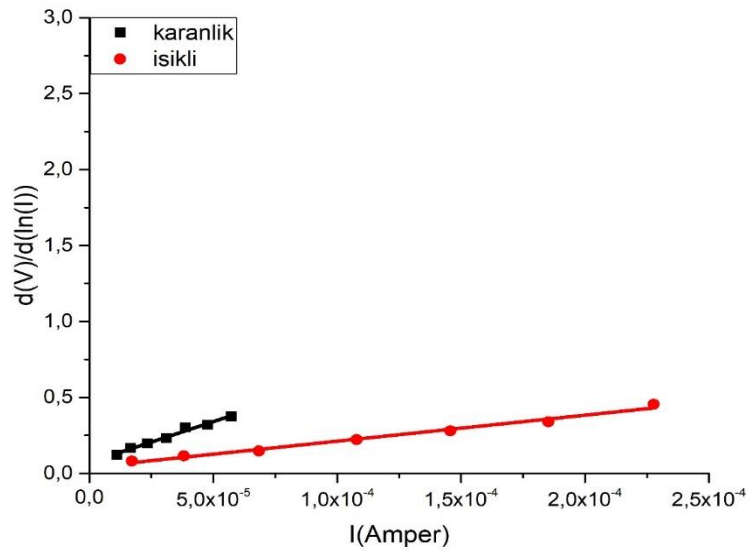


Şekil 4. 185: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 186: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 1 μA , ışıklı ortamda 8 μA 'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı, karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 3,11 V değerinde 1 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

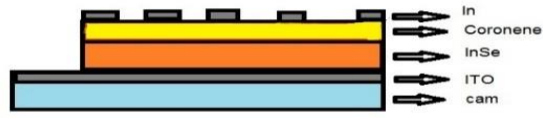


Şekil 4. 187: Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

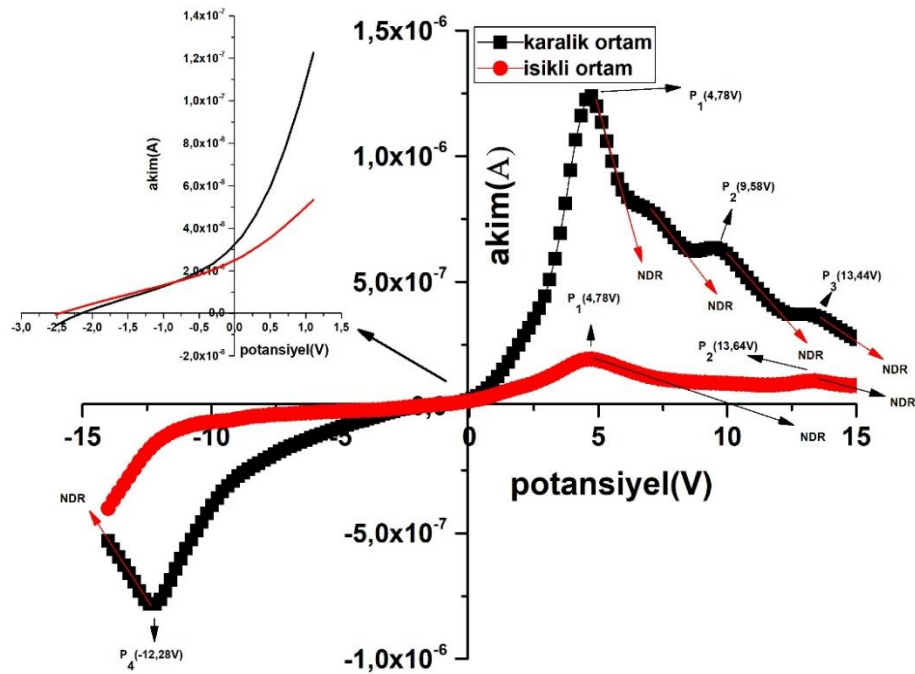
Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,071, n idealite faktörü 2,84, R_s değeri 5,3 k Ω ve ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,05, n idealite faktörü 2, R_s değeri 1,5 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.3 Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.188’de, I-V karakteristiği şekil 4.189’da ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,190’da gösterilmiştir.

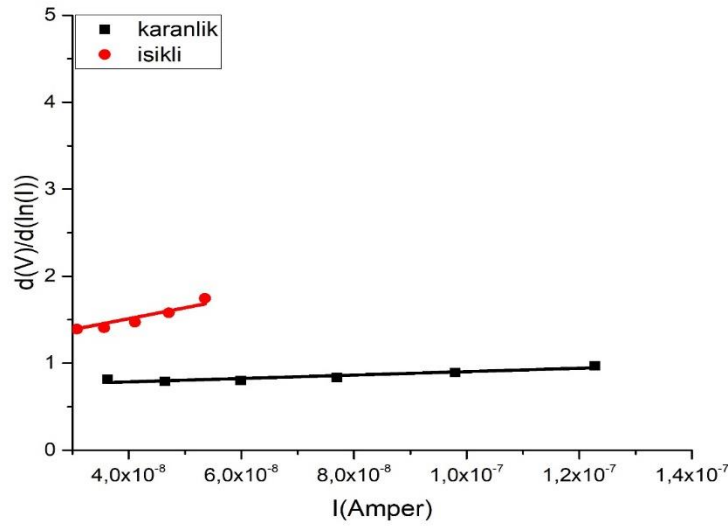


Şekil 4. 188: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 189: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 0,03 μA , ışıklı ortamda 0,025 μA 'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin azaldığı karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 4,78 V, 9,58 V, 13,44 V ve -12,28 V değerlerinde 4 adet vadi pikinin, ışıklı ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 4,78 V, 13,64 V değerlerinde 2 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

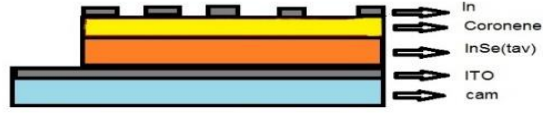


Şekil 4. 190: Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

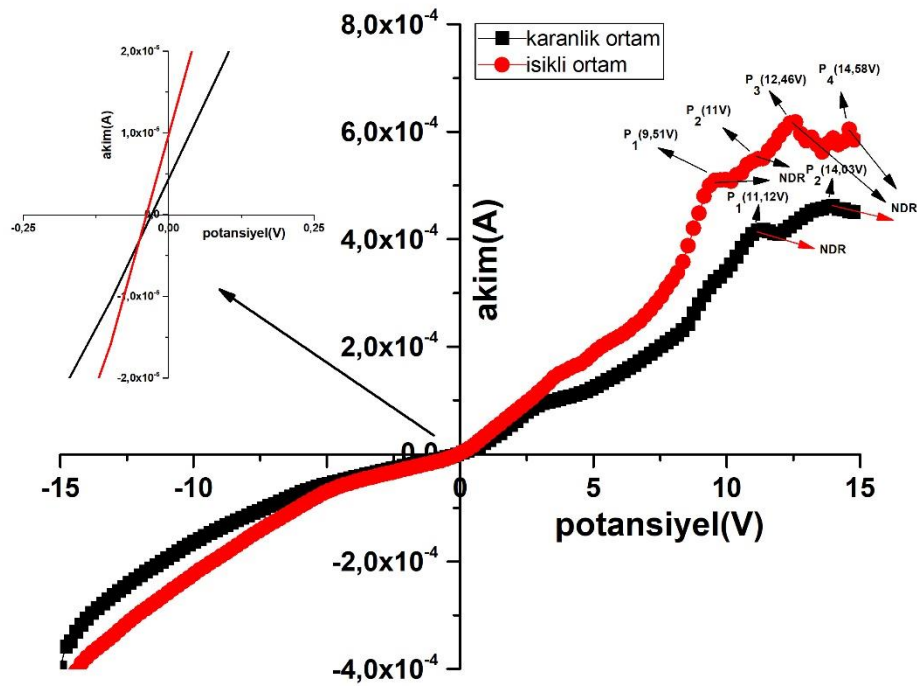
Cam/ITO/InSe/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,707, n idealite faktörü 2,28, R_s değeri 1962,8 $k\Omega$, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 1,01, n idealite faktörü 40,4, R_s değeri 12579,8 $k\Omega$ olarak belirlenmiştir.

4.4.4 Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.191'de, I-V karakteristiği şekil 4.192'de ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,193'te gösterilmiştir.

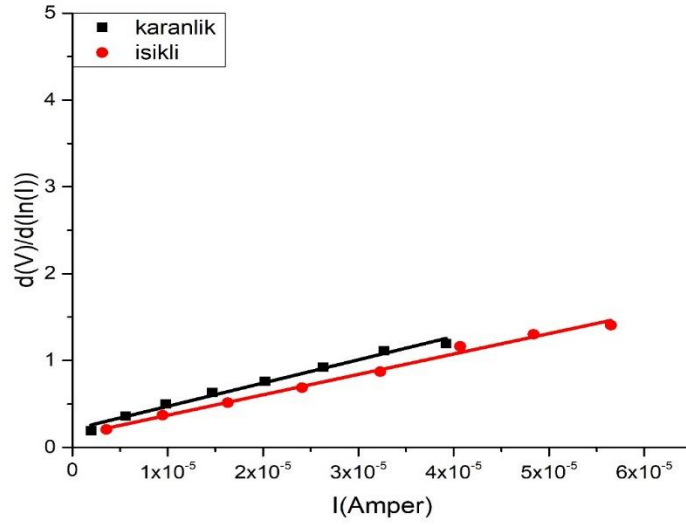


Şekil 4. 191: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 192: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda $0,45 \mu\text{A}$, ışıklı ortamda $0,98 \mu\text{A}$ 'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı, karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 11,12 V, 14,02 V, değerlerinde 2 adet vadi pikinin, ışıklı ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 9,51 V, 11 V, 12,46 V, 14,58 V değerlerinde 4 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4. 193: Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

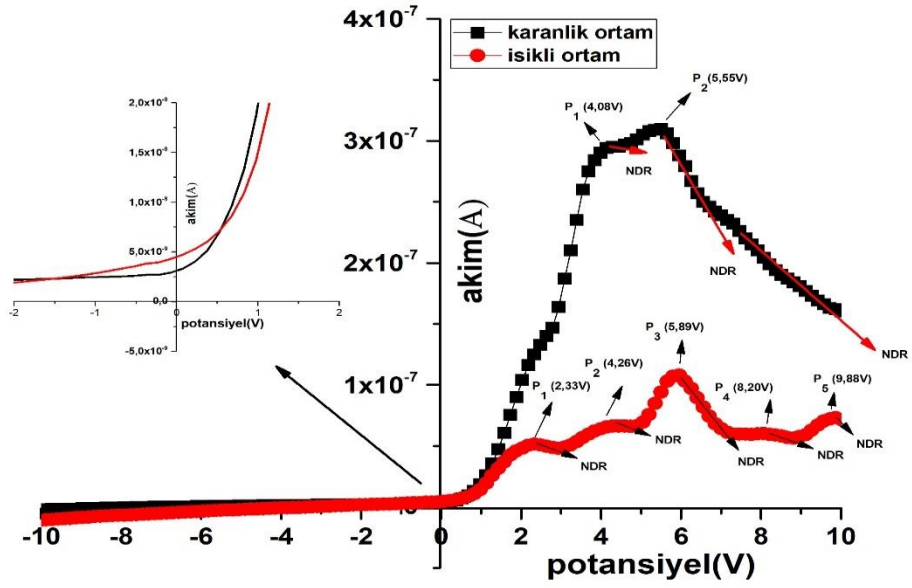
Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,179, n idealite faktörü 7,16, R_s değeri 29,1 k Ω , ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,115, n idealite faktörü 4,6, R_s değeri 24,6 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.5 Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.194'te, I-V karakteristiği şekil 4.195'te ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 196'da gösterilmiştir.

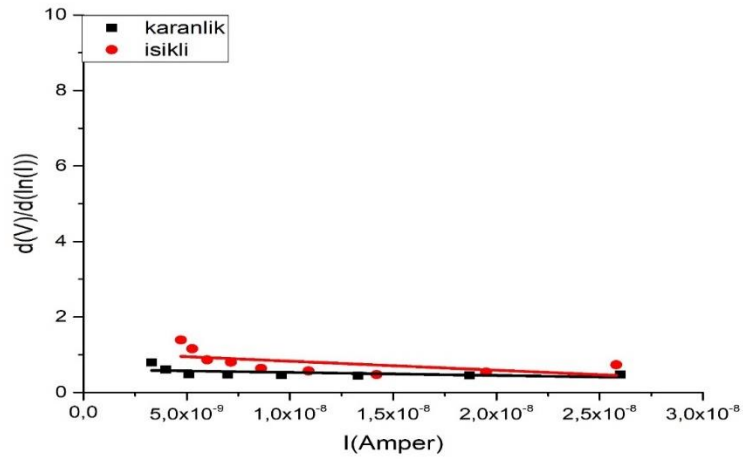


Şekil 4. 194: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 195: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 3,3 nA, ışıklı ortamda 2,9 nA'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin azaldığı, karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 4,08 V, 5,55 V, değerlerinde 2 adet vadi pikinin, ışıklı ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 2,33 V, 4,26 V, 5,89 V, 8,20 V, 9,88 V değerlerinde 5 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

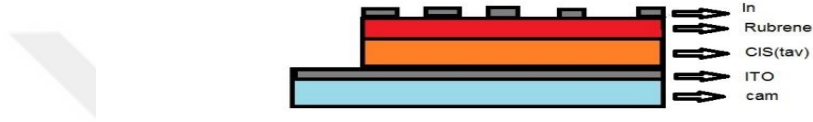


Şekil 4. 196: Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

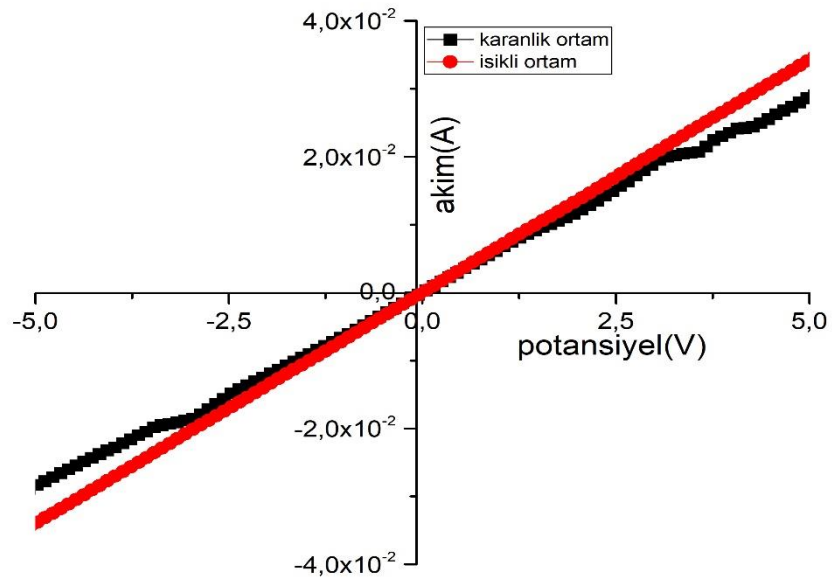
Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,61, n idealite faktörü 24,4, R_s değeri 7677,1 k Ω olarak, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 1,06, n idealite faktörü 42,4, R_s değeri 80993,6 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.6 Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.192’de, I-V karakteristiği şekil 4.193’te gösterilmiştir.



Şekil 4. 197: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 198: Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

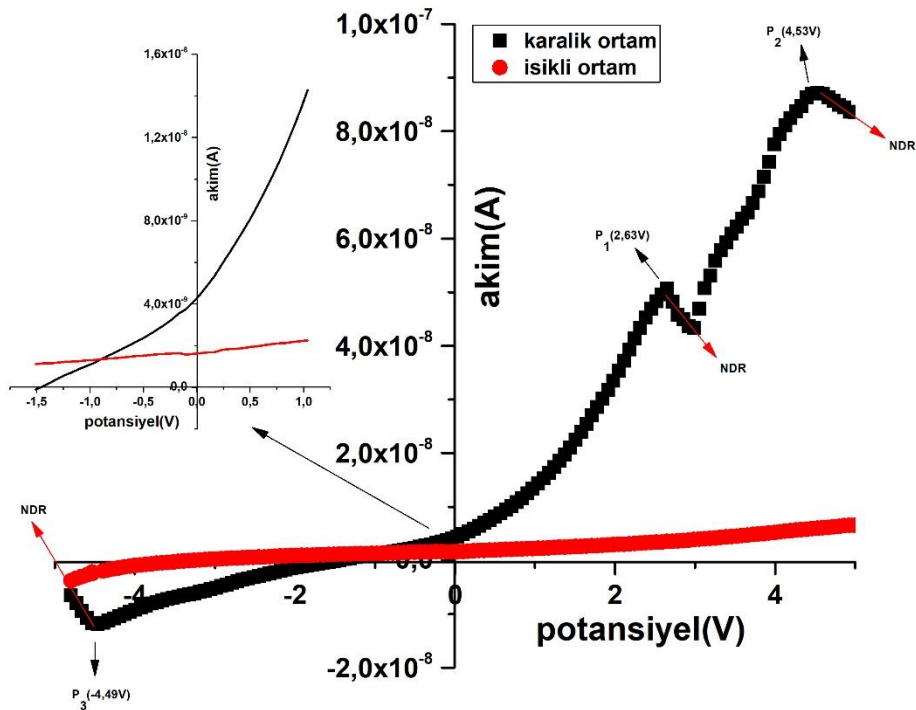
Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In heteroekleminin doğrultucu karakteristik göstermediği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı görülmektedir. Cam/ITO/CIS/rubrene/In heteroeklemi doğrultucu karakteristik göstermediği için $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği çizilmemiştir.

4.4.7 Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.199’da, I-V karakteristiği şekil 4.200’de ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği 4,201’de gösterilmiştir.

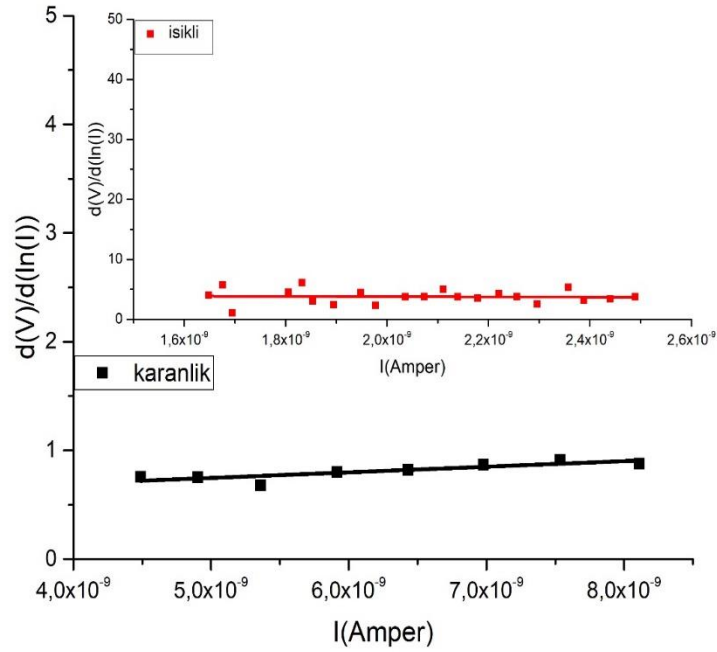


Şekil 4. 199: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 200: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 4,1 nA, ışıklı ortamda 1,9 nA'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin azaldığı karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 2,63 V, 4,53 V, -4,49 V değerlerinde 3 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

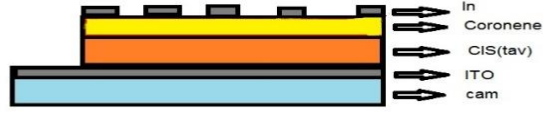


Şekil 4. 201: Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

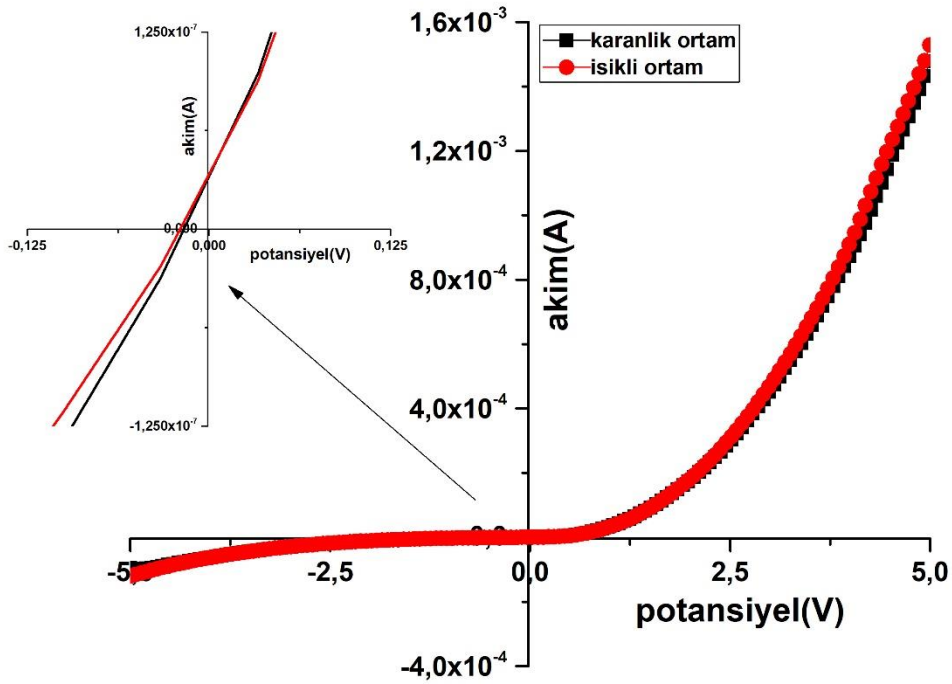
Cam/ITO/CIS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,489, n idealite faktörü 19,56, R_s değeri 51563,9 k Ω olarak, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 4,21, n idealite faktörü 168,4, R_s değeri 3356396,1 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.8 Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.202'de, I-V karakteristiği şekil 4.203'te ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,204'te gösterilmiştir.

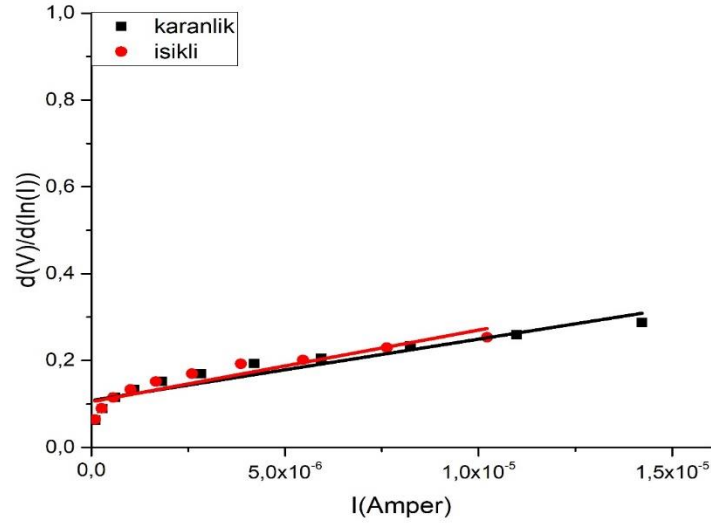


Şekil 4. 202: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 203: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 3,08 nA, ışıklı ortamda 3,49 nA'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı görülmektedir.

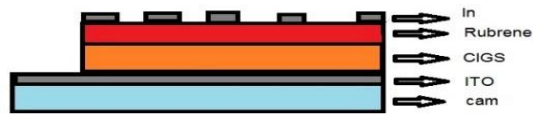


Şekil 4. 204: Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

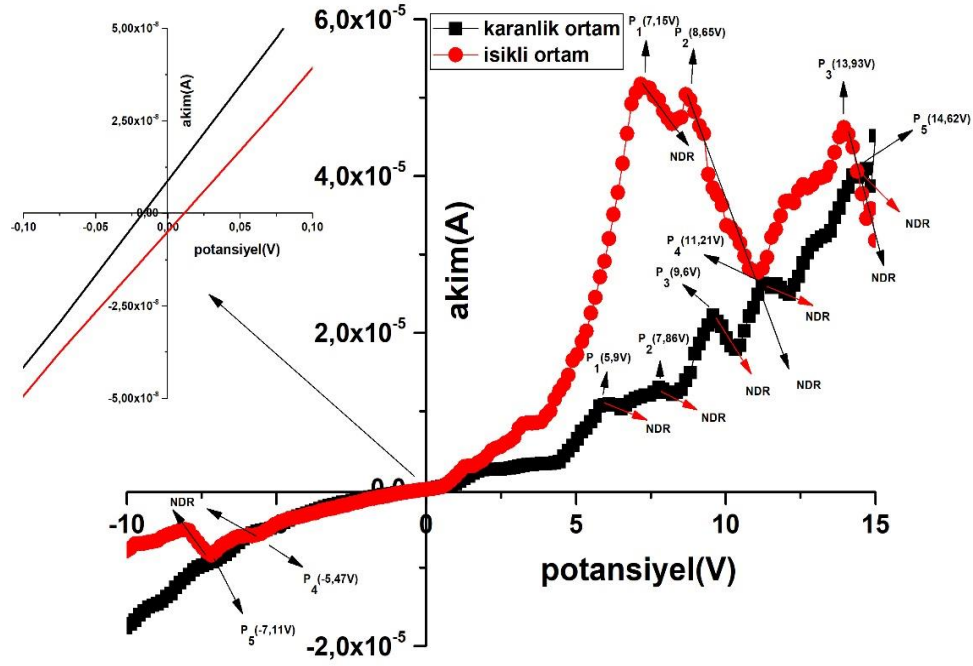
Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,108, n idealite faktörü 4,32, R_s değeri 14,1 k Ω olarak, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,105, n idealite faktörü 4,2, R_s değeri 12,9 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.9 Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.205'te, I-V karakteristiği şekil 4.206'da ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği şekil 4,207'de gösterilmiştir.

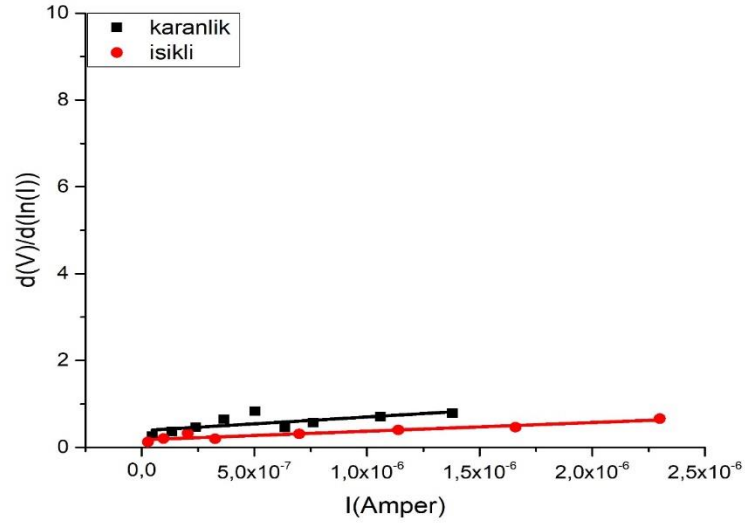


Şekil 4. 205: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 206: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 8,9 nA, ışıklı ortamda -5,5 nA'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı, karanlık ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 5,9 V, 7,86 V, 9,6 V, 11,21 V, 14,62 V değerlerinde 5 adet vadi pikinin, ışıklı ortamda ölçülen I-V karakterizasyonunda 7,15 V, 8,65 V, 13,93 V, -5,47 V, -7,11 V değerlerinde 5 adet vadi pikinin var olduğu ve NDR (negatif diferansiyel direnç) etkisinin bariz bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

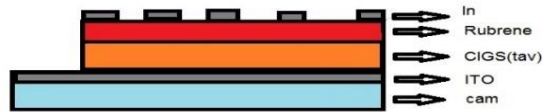


Şekil 4. 207: Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

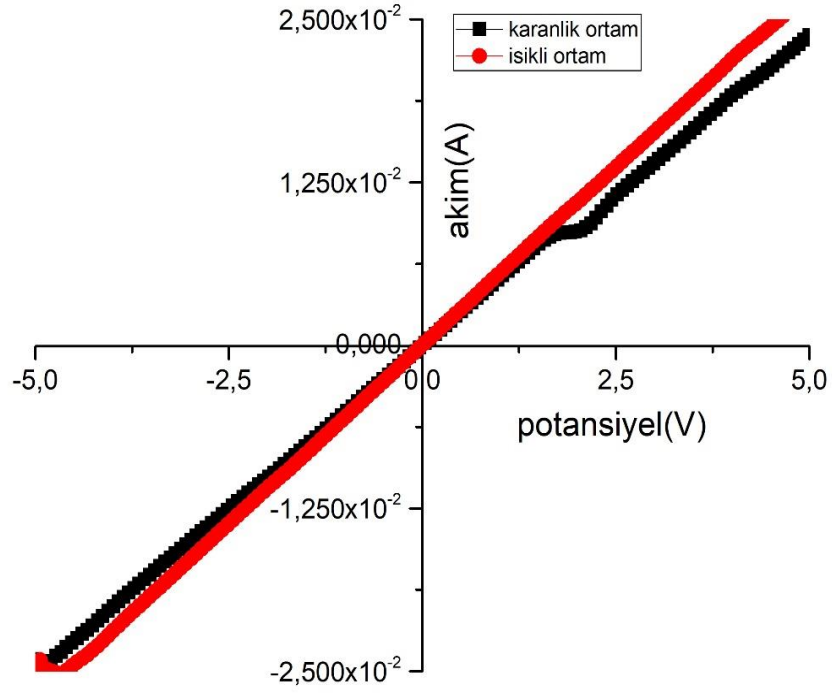
Cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,365, n idealite faktörü 14,6, R_s değeri 315,0 k Ω olarak, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,17, n idealite faktörü 6,8, R_s değeri 199,1 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.10 Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.200’de, I-V karakteristiği şekil 4.201’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 208: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin şematik gösterimi.

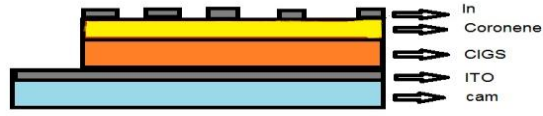


Şekil 4. 209: Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

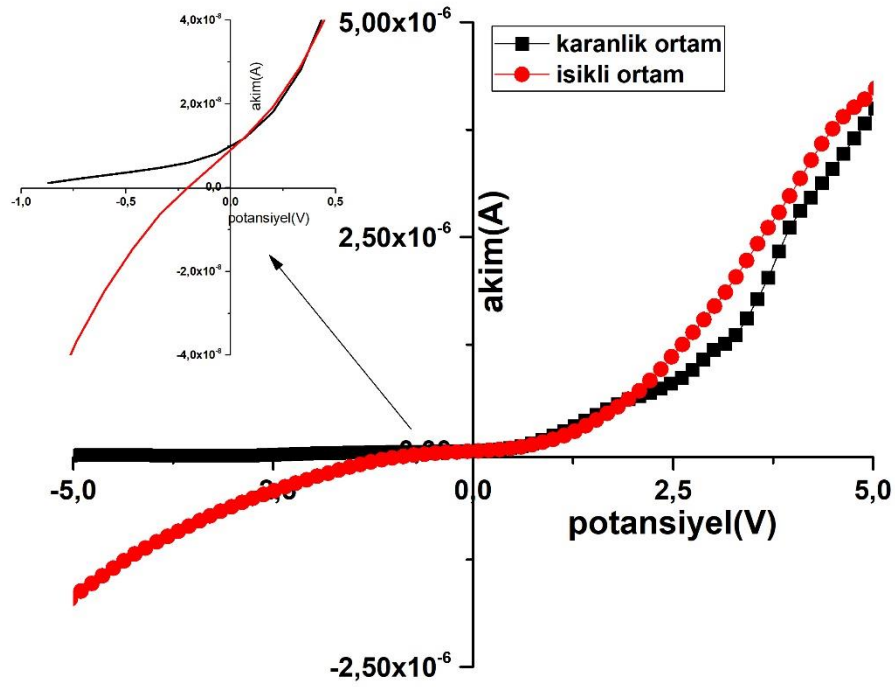
Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroekleminin doğrultucu karakteristik göstermediği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı görülmektedir. Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In heteroeklemi doğrultucu karakteristik göstermediği için $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği çizilmemiştir.

4.4.11 Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.210'da, I-V karakteristiği şekil 4.211'de ve $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği 4,212'de gösterilmiştir.

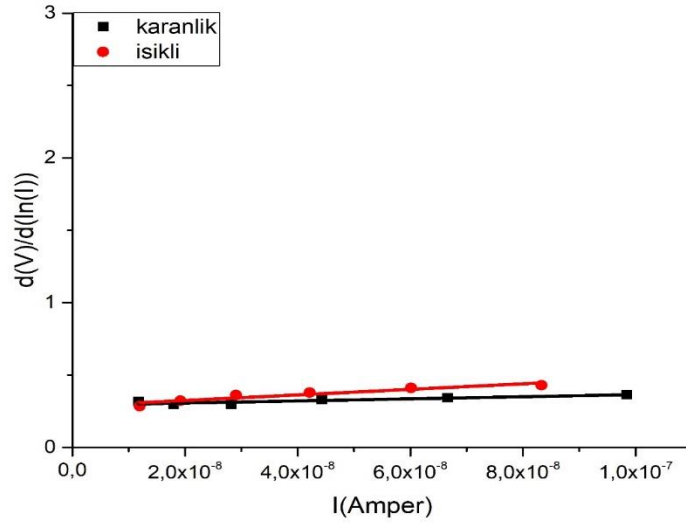


Şekil 4. 210: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 211: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroeklemi dış potansiyelin sıfır olduğu anda karanlık ortamda 9,76 nA, ışıklı ortamda 9,08 nA'lık bir akım oluşturduğu görülmektedir. Heteroeklemin diyot karakteristiği gösterdiği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 212: Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği.

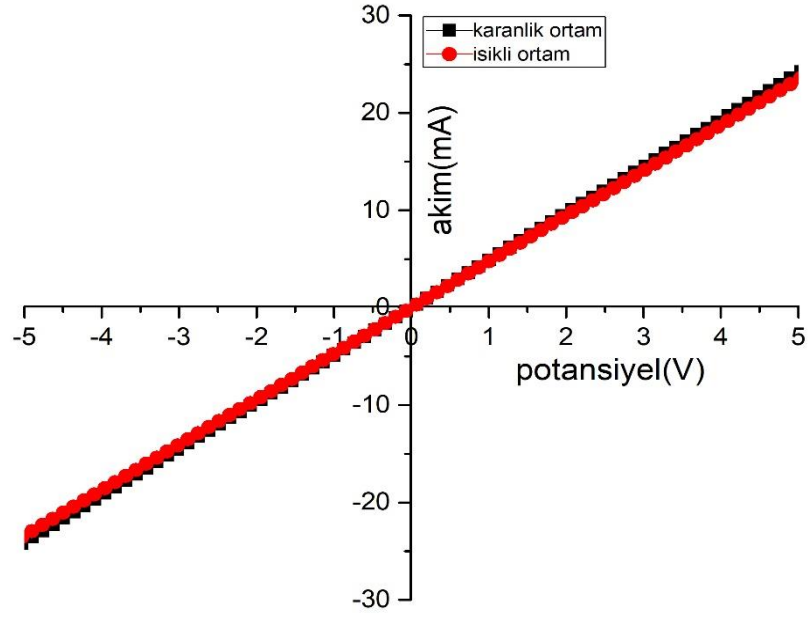
Cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroekleminin $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiğinde karanlık ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,291, n idealite faktörü 11,64, R_s değeri 2895,9 k Ω olarak, ışıklı ortamda $I=0$ noktasında $d(V)/d(\ln(I))$ değeri 0,286, n idealite faktörü 11,44, R_s değeri 1162,8 k Ω olarak belirlenmiştir.

4.4.12 Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin elektriksel özellikleri

Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi şekil 4.213'te, I-V karakteristiği şekil 4.214'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 213: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin şematik gösterimi.



Şekil 4. 214: Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin I-V karakteristiği.

Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroekleminin doğrultucu karakteristik göstermediği, ışığa duyarlı olduğu, ışık altında iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroeklemi doğrultucu karakteristik göstermediği için $d(V)/d(\ln(I))$ -I grafiği çizilmemiştir.

5. TARTIŞMA SONUÇ

Bu çalışmada elektrokimyasal kaplama yöntemi kullanılarak cam/ITO alt tabanı üzerine InSe, CIS ve CIGS inorganik yarıiletken bileşikleri ince film formunda kaplandı. Üretilen filmler iki gruba ayrıldı ve bir grup uygun sıcaklıklarda tavlandı. Tavlanan ve tavlanmayan filmlerin ayrı ayrı yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri incelendi. Daha sonra elde edilen cam/ITO/InSe, cam/ITO/CIS ,cam/ITO/CIGS ve bu ince filmlerin tavlanmış hallerinin üzerine ayrı ayrı rubrene ve coronene organik yarıiletken bileşikleri termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak ince film formunda kaplandı. Elde edilen cam/ITO/InSe/rubrene, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene, cam/ITO/CIS/rubrene, cam/ITO/CIS(tav)/rubrene cam/ITO/CIGS/rubrene, cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene ve cam/ITO/InSe/coronene, cam/ITO/InSe(tav)/coronene, cam/ITO/CIS/coronene, cam/ITO/CIS(tav)/coronene cam/ITO/CIGS/coronene, cam/ITO/CIGS(tav)/coronene heteroeklemlerinin yapısal, yüzeysel ve optiksel özellikleri incelendi. Daha sonra tüm heteroeklemlere In (indiyum) kontaklar alınarak karanlık ve ışıklı ortamda elektriksel karakteristikleri incelendi.

Üretilen filmlerin kalınlıkları çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5. 1: Üretilen filmlerin kalınlıkları.

İnce Film	Kalınlık (nm)
InSe	1501
InSe(tav)	452
CIS	922
CIS(tav)	880
CIGS	836
CIGS(tav)	607
rubrene	650
coronene	302

Tavlamanın etkisiyle InSe, CIS ve CIGS filmlerinin kalınlıkları azalmıştır. Bu azalmanın sebebi; filmi oluşturan yapıların sıcaklığın etkisiyle elementel dağılımlarının değişmesi, bazı fazların ortaya çıkması ve bazı fazların ortadan kaybolmasıdır.

Cam/ITO/InSe ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin InSe ve In_2O_3 fazlarını içerdiği görülmektedir. Cam/ITO/InSe(tav) ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin InSe, In_6Se_7 ve $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ fazlarını içerdiği görülmektedir. Tavlama ile filmin kimyasal yapısında değişikliklerin olduğu, InSe fazının hala mevcut olduğu, In_2O_3 fazının ortadan kalktığı, $\text{In}_2(\text{SeO}_4)_3$ ve In_6Se_7 fazının ortaya çıktığı görülmektedir. Ayrıca bazı $2\theta^\circ$ değerlerinde tavlama ile pik şiddetlerinin arttığı da görülmektedir. Bu da kristalleşmenin arttığını gösterir. Tavlama ile ince filmde meydana gelen bu değişiklikler yapılan literatür taramalarıyla uyum içerisindedir. Daha önceki çalışmalarında SILAR yöntemi ile ürettiğim InSe ince filmlerinin In_2Se_3 fazını içerdiği tavlamanın etkisiyle bu fazın InSe dönüştüğü gözlemledim [1]. Madugu M.L. ve diğ. yapmış oldukları çalışmada elde ettikleri filmlerin InSe fazını içerdiğini, filmleri tavladıktan sonra InSe fazının hala mevcut In_2Se_3 ve elementel Se fazlarının ortaya çıktığını görmüşlerdir [110]. Sreekumar R. ve diğ. kimyasal banyo depolama yöntemiyle ürettikleri InSe ince filmlerinin tavlama ile faz değişiminin gerçekleştiğini görmüşlerdir [111].

Cam/ITO/CIS ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin CuInSe_2 , $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$, In_2Se_3 , CuSe ve InSe fazlarını içerdiği görülmektedir. Cam/ITO/CIS(tav) ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin $\text{Cu}_{0,28}\text{In}_{1,72}\text{Se}_{2,72}$, In_2O_3 , $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$, CuO , CuSe fazlarını içerdiği görülmektedir. Tavlama ile filmin kimyasal yapısında değişikliklerin olduğu, CuSe ve $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ fazının hala mevcut olduğu, CuInSe_2 , In_2Se_3 ve InSe fazının ortadan kalktığı, In_2O_3 ve CuO fazının ortaya çıktığı görülmektedir. Oksitli bileşiklerin ortaya çıkma sebebi; atmosfer ortamında tavlama işleminin gerçekleştirilmesi gösterilebilir. Murat K. ve diğ. CIS ince filmleri üzerine yaptıkları çalışmalarda tavlama işlemi ile filmin kimyasal yapısında değişikliklerin olduğunu, In_2O_3 fazının ortadan kalktığını In_4Se_3 fazının ortaya çıktığını görmüşlerdir [78].

Cam/ITO/CIGS ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin $\text{CuGa}_2\text{O}_{14}\text{Se}_4$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, In_2O_3 , CuIn_3Se_5 , In_4Se_3 , CuGa_2O_4 , CuO fazlarını içerdiği görülmektedir. Cam/ITO/CIGS(tav) ince filminin XRD spektrumundan filmi oluşturan bileşiklerin $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{Se}_2$, $\text{CuGa}_{0,6}\text{In}_{2,4}\text{Se}_5$, InSe , In_6Se_7 fazlarını içerdiği görülmektedir. Bazı bileşikler tavlama ile ortadan kalkarken bazı yeni bileşiklerin ortaya çıktığı görülmüştür. Fazlardaki bu değişim literatür taramasıyla uyum içerisindedir öyle ki Murat K. ve diğ. yaptıkları bir çalışmada tavlama işlemi ile filmin kimyasal yapısında

değişikliklerin olduğunu görmüşlerdir [78]. Tavlama ile piklerin şiddetinin arttığıda görülmektedir.

Cam/ITO/InSe, cam/ITO/InSe(tav), cam/ITO/CIS, cam/ITO/CIS(tav) ve cam/ITO/CIGS alt tabanları üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumundan P-1 triklinik yapısında olduğu belirlendi. Farklı yüzeyler üzerinde aynı parametrelere sahip filmler elde edilmiş fakat bazı piklerin $2\theta^\circ$ değerleri farklılık göstermiştir. Buda rubrene ince filmlerinin farklı hkl düzlemlerinde kristalleştikleri anlamına gelmektedir. Cam/ITO/CIGS(tav) üzerine büyütülen rubrene ince filminin XRD spektrumundan Pbca ortorombik yapısında olduğu belirlendi. Rubrene doğası gereği farklı yüzeyler üzerinde farklı tipte kristalleşebilme özelliğine sahiptir. Bu durum literatür taramasıyla uyum içerisindedir. Öyle ki Taylor W.H. rubrene ince filmlerini monoklinik [112], Akopyan S.A. ve diğ. triklinik [113] ve Henn D.E. ve diğ. ortorombik [114] örgü tipine sahip filmler elde etmişlerdir [115].

Cam/ITO/InSe alt tabanı üzerine büyütülen coronene ince filminin I41-acd tetragonal yapısında olduğu, cam/ITO/InSe(tav), cam/ITO/CIGS, cam/ITO/CIGS(tav) alt tabanları üzerine büyütülen coronene ince filminin P1 21/c1 monoklinik yapısında olduğu, cam/ITO/CIS ve cam/ITO/CIS(tav) alt tabanı üzerine büyütülen coronene ince filminin P1 21/n1 monoklinik yapısında olduğu XRD spektrumlarından belirlenmiştir. Farklı yüzeylerde farklı parametrelere sahip filmler elde edilmiştir ve aynı parametrelere sahip filmlerde farklı düzlemlerde kristalleşmenin olduğu görülmüştür. Coronene doğası gereği farklı yüzeyler üzerinde farklı tipte kristalleşebilme özelliğine sahiptir. Zesheng A. ve diğ. sentezledikleri coronenelerin XRD spektrumunda hegzagonal yapıda olduğunu belirtmişlerken [116], Barış B. ve diğ., Taylzin A.B. ve diğ. monoklinik yapıda olduğunu belirtmişlerdir [64, 117].

SEM analizinde; cam/ITO/InSe ince filminin pürüzlülüğünün tavlamanın etkisiyle arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi tavlama ile küçük parçacıkların birleşerek daha büyük yapılar oluşturmasıdır. Sarita B. ve diğ. yapmış oldukları bir çalışmada ürettikleri InSe ince filmlerinin tavlamanın etkisiyle pürüzlülüğünün arttığını SEM analizinde görmüşlerdir [118]. Yine bir başka çalışmada Ornelas R.E. ve diğ. ürettikleri In₆Se₇ ince filmlerinin tavlamanın etkisiyle yüzeysel özelliklerinin değiştiğini, pürüzlülüğün arttığını gözlemlemişlerdir [119]. Yapılan XRD analizinde görüldüğü üzere tavlama işlemi yapıldıktan sonra filmi oluşturan fazlarda değişiklikler meydana gelmiştir. Fazlarda ki bu değişimler filmin yüzeysel yapısının, şeklinin ve pürüzlülüğünün değişmesine sebep olmuştur [8]. Cam/ITO/CIS ince filminin pürüzlülüğünün tavlamanın etkisiyle azaldığı

görülmektedir. Cam/ITO/CIS ince film yüzeyinin pürüzlü, dağılımın düzensiz ve bazı bölgelerde topaklanmaların var olduğu görülmektedir. Tavlamanın etkisiyle topaklanmalar gözden kaybolmuş, küre şeklinde daha düzenli taneciklerin olduğu gözlemlenmiştir. Bari R. H. ve diğ. ürettikleri CIS filmlerinin SEM analizinde yüzeydeki taneciklerin küre şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir [77]. Kashyout A.E. ve diğ., Ji-Hyun C. ve diğ. sentezledikleri CuInSe_2 filmlerinin tavlamanın etkisiyle tanecik boyutunun ve tanecik yapısının değiştiğini gözlemlemişlerdir [75, 120]. Cam/ITO/CIGS ince filminin yüzeyinin pürüzlü olduğu, taneciklerin küresel formda kristalleştiği ve taneciklerin neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Tavlamanın etkisiyle ince film pürüzlüğü azaldığı görülmektedir. Venkatachalam M. ve diğ. CIGS ince filmlerini farklı sıcaklıklarda tavlamışlar ve bazı sıcaklıklarda film pürüzlülüğünün arttığını bazı sıcaklıklarda azaldığını gözlemlemişlerdir ve burada tavlama ile filmi oluşturan bileşiğin elementel dağılımındaki değişikliğe bağlamışlardır [8].

Farklı alt banlar üzerine büyütülen rubrene ve coronene ince filmlerinin pürüzlülük değerlerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. Cam/ITO/InSe, cam/ITO/CIGS, cam/ITO/CIGS(tav) alt tabanları üzerine büyütülen rubrene ince filmlerinin yüzeyleri pürüzlü ve dağılımlarının düzensiz olduğu görülmüştür. Kristalleşme gelişi güzel gerçekleşmiş ve bazı bölgelerde topaklanmaların olduğu görülmüştür. Cam/ITO/InSe(tav), cam/ITO/CIS, cam/ITO/CIS(tav) alt tabanları üzerine büyütülen rubrene ince filmlerinin yüzeylerinin pürüzlü ve neredeyse homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Kristalleşme film yüzeyinin tamamında ve küresel biçimde gerçekleşmiştir. Cam/ITO/CIGS alt tabanı üzerine büyütülen coronene ince filmi hariç diğer coronene ince filmlerinin yüzeylerinin pürüzlü ve neredeyse homojen bir dağılıma sahip oldukları görülmüştür. Rubrene ve coronene filmlerinin pürüzlülük değerlerinin farklı olması büyütüldükleri alt tabanların farklı fiziksel özelliklere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Öyle ki aynı örgü tipine ve parametrelere sahip coronene ve rubrene ince filmlerinde farklı hkl düzlemlerinde kristalleşmelerin olduğu XRD analizlerinde görülmüştür. Çizelge 5.2’de ince filmlerin pürüzlülük değerleri verilmiştir.

EDS analizinde; hem InSe, CIS, CIGS filmlerinin hem de bunların tavllanmış hallerinde elementel dağılım genel itibari ile homojen olduğu görülmektedir. Elektron fotoğraflarında filmlerin bazı bölgelerinde çok küçük boşlukların var olduğu tavlamanın etkisiyle bu boşlukların az da olsa arttığı görülmektedir. Tavlamanın etkisiyle filmi oluşturan elementlerin daha sıkı paketler halinde bir arada olduğu ve oksijen atomlarının yapı

içerisinde yoğunluğunun da arttığı görülmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur ve atmosfer ortamında tavlama işlemi yapmanın dezavantajlarındandır.

Çizelge 5.2’de filmlerin AFM ve SEM parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5. 2: Filmlerin AFM ve SEM parametreleri.

İnce Film	AFM Pürüzlülük (nm)	AFM En düşük derinlik (nm)	AFM En yüksek tepe (nm)	SEM Pürüzlülük (nm)
cam/ITO/InSe	222,07	-721,99	1630,6	316
cam/ITO/InSe/rubrene	283,27	-837,31	1559,5	451
cam/ITO/InSe/coronene	228,89	-906,48	1792,1	298
cam/ITO/InSe(tav)	364,72	-1204,9	2241	332
cam/ITO/InSe(tav)/rubrene	229,51	-948,64	1099,6	396
cam/ITO/InSe(tav)/coronene	316,36	-1308,8	1683,5	374
cam/ITO/CIS	231,6	-1405,6	2412,2	542
cam/ITO/CIS/rubrene	182,82	-1019,8	1459,5	192
cam/ITO/CIS/coronene	172,81	-667,8	1604,5	161
cam/ITO/CIS(tav)	185,5	-721,54	1534,4	145
cam/ITO/CIS(tav)/rubrene	254,46	-915,37	1652	239
cam/ITO/CIS(tav)/coronene	248,97	-1047,8	1409,7	271
cam/ITO/CIGS	282,12	-1282,7	1679,5	386
cam/ITO/CIGS/rubrene	411,05	-1400,7	1936,3	332
cam/ITO/CIGS/coronene	254,81	-1033,3	1214,1	214
cam/ITO/CIGS(tav)	128,52	-443,26	916,79	207
cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene	703,44	-4930	4930	428
cam/ITO/CIGS(tav)/coronene	451,52	-1616,2	1776,2	259

AFM analizinde; InSe ince filminin pürüzlülüğü tavlama ile artmışken CIS ve CIGS ince filmlerinin pürüzlülükleri tavlama ile azalmıştır. InSe ince filminin tavlama ile pürüzlülüğünün artması literatür taraması ile uyum içerisindedir. Öyle ki Sol Lee ve diğ.

ürettikleri ince filmleri farklı sıcaklıklarda tavlamışlar ve tavlama sıcaklığının artmasıyla pürüzlülüğün arttığını gözlemlemişlerdir [121]. Daha önce çalışmamda InSe ince filmlerinin tavlama ile parçacık boyutunun arttığını gözlemledim. Tavlamanın etkisiyle küçük parçacıklar bir araya gelerek daha büyük parçacıklar meydana getirmiştir [1]. Madugu M.L. ve diğ. ürettikleri InSe ince filmlerinin parçacık boyutunun tavlama ile arttığını gözlemlemişlerdir [110].

CIS ve CIGS filmlerinin tavlama ile pürüzlülüklerinin azalması da literatür taramasıyla uyum içerisindedir. Öyle ki; Venkatachalam M. ve diğ. CIGS ince filmlerini farklı sıcaklıklarda tavlamışlar ve tavlama ile film pürüzlülüğünün azaldığını gözlemlemişlerdir ve bunu da tavlama ile filmi oluşturan bileşiğin elementel dağılımındaki değişikliğe bağlamışlardır [8]. Kashyout A.E. ve diğ., Ji-Hyun C. ve diğ. sentezledikleri CIS filmlerinin tavlamanın etkisiyle tanecik boyutunun ve tanecik yapısının değiştiğini gözlemlemişlerdir [75, 120].

Rubrene ve coronene filmlerinin pürüzlülüklerinin ve diğer yüzey parametrelerinin farklı olması büyüttükleri alt tabanın yüzey özelliklerine ve kimyasal yapısına bağlı olduğu düşünülmektedir. XRD analizinden üretilen filmlerin yapısal özelliklerinin farklı olduğu görülmektedir. Sinha S. ve diğ. AFM analizinden farklı yüzeyler üzerine büyüttükleri rubrene ince filmlerinin farklı formlara ve yüzey parametrelerine sahip olduklarını gözlemlemişlerdir [54]. Zhang C. ve diğ. ürettikleri coronene ince filmlerinin parçacık boyutlarının ve yüzeysel özelliklerinin farklı olduğunu gözlemlemişlerdir [122]. Chaoqiang X. ve diğ. Cu, Cu/NaCl, Ag, Ag/KCl gibi alt tabanlar üzerine büyüttükleri coronene ince filmlerinin farklı yüzeysel parametrelere sahip olduklarını belirtmişlerdir [11].

Optiksel analizde; InSe ince filminin yasak enerji aralığı 1,85 eV'tan 1,63 eV'a düşmüştür. Bu düşüşün sebebi parçacık boyutunun yani pürüzlülüğün artmasıyla ilişkilendirilebilir. Küçük boyuttaki parçacıkların tavlamanın etkisiyle birleşerek daha büyük parçacıklar haline gelmiştir. Daha büyük yapıların meydana gelmesi tanecik sınırındaki dağılmaları azaltmış bu da yasak enerji band aralığının düşmesine sebep olmuştur [123]. Ayrıca parçacık boyutu arttıkça kuantum alan etkisinin sonucu olarak yasak enerji aralığı azalabilir. Kuantum alan etkisi küçük boyuttaki (20 nm ve daha aşağısı) parçacıklara etki etmektedir ve iç boyutun bir fonksiyonu olarak enerji seviyelerindeki bütünsel değişimlerden kaynaklanmaktadır. Pürüzlülük yani parçacık boyutu artarken kuantum olaylar daha zayıf ve enerji seviyeleri arası ayrılmalar daha küçük olmaktadır. Bu neticede yasak enerji aralığının azalmasına sebep olur. Filmlerde parçacık boyutunun artması bazı yapısal kusurların da ortaya çıkmasına

sebepe olabilir ve bu da band kenarlarında izinli durumların oluşmasına sebep olabilir. Bu izinli durumların oluşması yasak enerji aralığının düşmesine sebep olmuştur [124].

CIS ince filminin yasak enerji aralığı 1,42 eV'tan 2,61 eV'a çıkmıştır. Bu artışın sebebi tavlama ile pürüzlülüğün azalması yani parçacık boyutunun azalmasıdır. Pürüzlülüğün azalması kuantum alan etkisinin artmasına bu etkinin artması da yasak enerji band aralığının artmasına sebep olmuştur [124]. Ayrıca tavlamanın etkisiyle filmi oluşturan elementlerin dağılımlarındaki değişiklik, bazı fazların ortadan kalkması ve bazı fazların ortaya çıkması yasak enerji band aralığının artmasına sebep olmuştur.

CIGS ince filminin yasak enerji aralığı 1,57 eV'tan 1,51 eV'a düşmüştür. Bu düşüşün sebebi XRD piklerinden de görüleceği üzere kristalleşmenin artması olabilir. Ayrıca filmin elementel dağılımında ki değişim, bazı fazların ortadan kalkması ve bazı fazların ortaya çıkmasında band aralığının düşmesine sebep olur.

Farklı yüzey, morfolojik ve optiksel özellikler gösteren filmlerin üzerine büyütülen rubrene ve coronene filmlerinin yasak enerji band aralıkları da farklıdır. Bu fark bazı filmlerde çok az iken bazı filmlerde çoktur. Doğası gereği rubrene ve coronene filmleri büyütüldükleri yüzeyin özelliklerine göre farklı tipte kristalleşme gösterebiliyorlar. XRD analizinde de görüldüğü üzere aynı parametrelere sahip filmlerde bile farklı 2θ değerlerinde pikler mevcuttur. Bu tip farklılıklar rubrene ve coronene filmlerinin yasak enerji band aralıklarının farklı olmasına sebep olmuştur.

Filmlerin yasak enerji band aralıklarındaki bu değişimler literatür taramaları ile uyum içerisindedir. Öyle ki; daha önceki çalışmamda InSe ince filmlerini farklı sıcaklıklarda tavlama sıcaklığının artmasıyla yasak enerji band aralığının düştüğü gözlemlenmiştir [1]. Yıldırım H. ve diğ. yapmış oldukları çalışmada filmlerin yasak enerji band aralıklarının tavlama ile değiştiğini gözlemlemiş 250 °C de tavladıkları filmin yasak enerji band aralığı yaklaşık 1,6 eV, 350 °C de tavladıkları filmin yasak enerji band aralığı 2,2 eV, 450 °C de tavlama sıcaklığının artmasıyla yasak enerji band aralıklarının 1,5 eV'a düştüğünü gözlemlemişlerdir [85].

InSe ince filminin 400 ve 700 nm de geçirgenliği tavlama ile azalırken CIS ve CIGS filmlerinin geçirgenlikleri tavlama ile artmıştır. Görünür bölge sınırlarındaki bu değerler literatür taraması ile uyum içerisindedir. H. Yıldırım ve diğ., S.F. Varol ve diğ. sentezledikleri CIGS ince filmlerinde benzer değerler görmüşlerdir [85, 125]. Bhuiyan M.A.S. ve diğ. sentezledikleri CIS ince filmlerinde benzer değerler görmüşlerdir [126].

Çizelge 5.3'te filmlerin yasak enerji band aralıkları, yasak enerji band aralığı tipi ve görünür bölge sınırlarında geçirgenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 5. 3: Filmlerin yasak enerji band aralıkları, yasak enerji band aralığı tipi ve görünür bölge sınırlarında geçirgenlik değerleri.

İnce Film	Yasak enerji band aralığı (eV)	Direk geçiş	İndirek geçiş	400 nm de geçirgenlik (%)	700 nm de geçirgenlik (%)
cam/ITO/InSe	1,85	x		5,89	19,07
cam/ITO/InSe/rubrene	2,16	x		3,96	8,44
cam/ITO/InSe/coronene	3,09		x	0,23	10,54
cam/ITO/InSe(tav)	1,63	x		1,12	11,65
cam/ITO/InSe(tav)/rubrene	2,17	x		0,42	7,96
cam/ITO/InSe(tav)/coronene	3,17		x	0,19	10,99
cam/ITO/CIS	1,42	x		0,07	0,22
cam/ITO/CIS/rubrene	2,07	x		0,16	0,29
cam/ITO/CIS/coronene	2,69		x	0,57	2,63
cam/ITO/CIS(tav)	2,61	x		4,47	32,26
cam/ITO/CIS(tav)/rubrene	2,14	x		2,91	24,77
cam/ITO/CIS(tav)/coronene	2,85		x	0,22	21,26
cam/ITO/CIGS	1,57	x		0,65	4,61
cam/ITO/CIGS/rubrene	2,13	x		0,07	0,61
cam/ITO/CIGS/coronene	2,87		x	0,06	0,62
cam/ITO/CIGS(tav)	1,51	x		5,39	6,28
cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene	2,87	x		0,97	3,99
cam/ITO/CIGS(tav)/coronene	2,14		x	2,91	5,59

Çizelge 5.4'te heteroeklemlerin sıfır (0) potansiyel altında karanlık ve ışıklı ortamda oluşturdukları akım değerleri, n idealite faktörleri ve seri direnç R_s parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5. 4: Heteroeklemlerin diyot tipleri, sıfır (0) potansiyel altında karanlık ve ışıklı ortamda oluşturdıkları akım değerleri ve diyot parametreleri.

Heteroeklem	0 Potansiyelde Eklemlerde Oluşan Akım		Karanlık Ortam		Işıklı Ortam	
	Karanlık Ortam	Işıklı Ortam	n	R_s (k Ω)	n	R_s (k Ω)
Cam/ITO/InSe/rubrene/In	0,125 μ A	0,187 μ A	6,36	74,8	6	59,2
Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In	1 μ A	8 μ A	2,84	5,3	2	1,5
Cam/ITO/InSe/coronene/In	0,03 μ A	0,025 μ A	28,28	1962,8	40,4	12579,8
Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In	0,45 μ A	0,98 μ A	7,16	29,1	4,6	24,6
Cam/ITO/CIS/rubrene/In	3,3nA	2,9nA	24,4	7677,1	42,4	80993,6
Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In	-	-	-	-	-	-
Cam/ITO/CIS/coronene/In	6nA	6,6nA	19,56	51563,9	168,4	3356396
Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In	3,08nA	3,49nA	4,32	14,1	4,2	19,9
Cam/ITO/CIGS/rubrene/In	8,9nA	-5,5 nA	14,6	315,0	6,8	199,1
Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In	-	-	-	-	-	-
Cam/ITO/CIGS/coronene/In	9,76nA	9,08nA	11,64	2895,9	11,44	1162,8
Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In	-	-	-	-	-	-

Çizelge 5,5'te heteroeklemlerin karanlık ve ışıklı ortamda, ters ve düz beslem altında I-V ölçümlerinde sergiledikleri davranışlar verilmiştir. Çizelge 5,5'te (NDR) negatif diferansiyel direnç, (LDR) ışığa bağımlı direnç, (+) davranışı gösterdiği, (-) davranışı göstermediği demektir.

Çizelge 5. 5: Heteroeklemlerin karanlık ve ışıklı ortamda, ters ve düz beslemde I-V ölçümünden sergiledikleri davranışlar.

Heteroeklem	NDR				Fotovoltaik (düz beslem)	Fotodiyot (ters beslem)
	Ters Beslem		Düz Beslem			
	Karanlık	Işıklı	Karanlık	Işıklı		
	Ortam	Ortam	Ortam	Ortam		
Cam/ITO/InSe/rubrene/In	-	-	+	-	2V’a kadar	+
Cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In	-	-	+	-	+	+
Cam/ITO/InSe/coronene/In	+	-	+	+	-	-
Cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In	-	-	+	+	+	+
Cam/ITO/CIS/rubrene/In	-	-	+	+	-	+
Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In	LDR					
Cam/ITO/CIS/coronene/In	+	-	+	-	-	-
Cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In	-	-	-	-	+	+
Cam/ITO/CIGS/rubrene/In	-	+	+	+	+	4V’a kadar
Cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In	LDR					
Cam/ITO/CIGS/coronene/In	-	-	-	-	+	+
Cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In	LDR					

Fotodiyotlar ters beslem altında çalışan, akım üreten, üzerine düşen ışığı algılayıp elektriksel sinyallere çeviren aygıtlardır [19]. Fotodiyotların kullanım alanları; uzaktan kumanda, alarm sistemi, sayma devreleri, yangın ihbar sistemleri, elektronik hesap makineleri gibi alanlardır [127]. Fotodiyotlar üzerine hiç ışık düşmediğinde bile çok az bir karanlık akıma (dark characteristic) sahiplerdir ve üzerlerine ışık düştüğünde bu karanlık akımlarda değişiklikler meydana gelir [128]. Cam/ITO/InSe/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIS/rubrene/In, cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIGS/rubrene/In, cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroeklemlerinin ters beslem ve ışık altında gösterdikleri davranışlar tipik fotodiyot özelliğidir. Işık altında bu heteroeklemlerin elektriksel iletkenlikleri artmıştır. Bu artışın sebebi; ışığın valans bandındaki elektronları koparıp serbest hale getirmesi, yeni boşluk-elektron çiftlerinin

oluşması, serbest hale gelen elektronların hem $V>0$, $I>0$ bölgesinde hem de $V<0$, $I<0$ bölgesinde akıma katkıda bulunmasıdır [1, 19, 20].

Wu X. ve diğ. sentezledikleri $\text{BiFeO}_2/\text{TiO}_2$ heteroeklemlerinin I-V karakterizasyonlarını karanlık ortamda ve ışık altında incelemişler ve $V>0$, $I>0$ bölgesinde ışığın elektriksel iletkenliği artırdığını gözlemlemişlerdir ve ürettikleri heteroeklemlerin fotovoltaiik özellik sergilediğini belirtmişlerdir [129]. Bu bağlamda cam/ITO/InSe/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIS/rubrene/In, cam/ITO/CIS(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIGS/rubrene/In, cam/ITO/CIGS/coronene/In heteroeklemleri düz beslem altında yani $V>0$, $I>0$ bölgesinde fotovoltaiik özellik göstermişlerdir. Daha önceki çalışmamda sentezlediğim $\text{Ag/InSe/GaSe}_{\text{kristal}}/\text{InSe/Ag}$ ve $\text{Ag/InSe/InSe}_{\text{kristal}}/\text{InSe/Ag}$ heteroeklemlerinde de benzer özellikler görülmüştür [1]. Güneş pillerinin çalışma prensibi fotovoltaiik özelliğe dayanır. Güneş pillerinde eklem direnci, eklemler arası fakirleşmiş bölge kalınlıkları, ışığın düştüğü yüzeyin kalınlığı, eklemin yüzey alanı gibi parametreler oldukça önemli parametrelerdir. Fotovoltaiik özellik gösteren eklemlerimiz uygun kalınlıklarda sentezlenmediği için güneş pili verimliliği, dolum faktörü, açık devre voltajı, kısa devre akımı gibi parametreler hesaplanamamıştır. Önümüzdeki çalışmalarda uygun kalınlıklarda filmler sentezleyip güneş pilleri parametrelerini hesaplamayı planlamaktayız.

Bilindiği gibi elektronik aygıtların boyutları git gide küçülmektedir ve küçük bir potansiyel fark altında bile oluşan elektrik alan çok yüksek değerlere ulaşabilir ve aygıttaki elektronik taşınım yüksek elektrik alan altında gerçekleşir. Eğer yarıiletken aygıtların boyutları 1 μm 'den küçükse elektron saçılmalarına maruz kalmadan aygıt içinde ilerleyebilir ki bu taşınım balistik taşınım olarak adlandırılır. Ortalama hızı sabit ve elektrik alandan bağımsız hale gelen elektronlara uygulanan elektrik alan biraz daha artırılırsa bazı yarıiletkenlerde alışlagelmişin dışında durumlar ortaya çıkabilir. Ortalama hız artık artmadığına göre acaba düşermiydi? Böyle bir davranış akımın artan voltajla azalması yani “diferansiyel direncin” negatif olması anlamına gelir. Direncin pozitif olduğu bölgede aygıtın voltaj kaynağından I şiddetinde bir akım çekerken elde ettiği güç,

$$P = I^2 R \quad (5.1)$$

ile ifade edilir. Direncin negatif olması demek bu soğrulan gücün negatif olması yani aygıtın kaynaktan aldığı enerjiyi yayması demektir. Yayılan enerji elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesine düşer. Bu ilginç davranışın uygulaması aygıtın üzerine düşen küçük

genlikli sinyallerin aygıt tarafından ısıya dönüştürülmesi yerine genliklerinin yükseltilmesi olur. Negatif diferansiyel direnç bölgesinde çalışan aygıt bir yükseltici gibi çalışır. İlk kez 1963 yılında Brian Ridley, NDR'in GaAs gibi bazı yarıiletkenlerde, sıcak elektronları mobilitenin yüksek olduğu iletkenlik bandı vadisinden (I), mobilitenin düşük olduğu iletkenlik bandı vadisine (L) geçirmekle mümkün olabileceğini göstermiştir. Daha sonra John Gunn tarafından yapılan deneysel gözlem aynı yıl Nobel'le ödüllendirilmiştir [20]. NDR özelliğine sahip devre elemanları, Gunn diyotları, tünel diyotlar, gaz deşarj tüpleridir [130]. NDR'in kullanım alanları frekans yükselticiler, osilatörler, refleksiyon yükselticileri, mantık anahtarları ve bellek hücreleridir [131]. NDR özelliğini sergileyen en yaygın devre elemanları tünel diyotlardır. Tünel diyotların çalışma prensibi kuantum mekaniksel tünelleme olayına dayanır. Eğer p-n eklemi aşırı derecede katkılanmışsa fakirleşmiş bölge genişliği oldukça daralır ve taşıyıcılar bariyeri aşmak yerine tünelleme ile bariyerin içinden arınmış bölgenin diğer tarafına geçerler. Bu p-n heteroeklemine potansiyel fark uygulanırsa işgal edilmiş olan iletkenlik bandı eklemnin diğer tarafında valans bandındaki boş seviyelerle aynı hizaya gelir ve elektron bu ince bariyeri tünelleyerek geçer. Düz besleme voltajı daha da artırılırsa tünelleme akımı maksimum seviyeye ulaşır ancak voltajın biraz daha artırılmasıyla eklemnin iki tarafındaki uygun enerji seviyelerinin çakışması sonlanır ve dolayısıyla tünelleme akımı azalır. Akım-gerilim eğrisinin bu bölgedeki eğimi negatiftir ve diyot bu bölgede negatif diferansiyel dirence sahip olur. Uygulanan besleme voltajı biraz daha artırıldığında artık enerji seviyeleri çakışmayacağından diyot tünelleme mekanizmasına dayalı olarak çalışmaz. Akım n tarafından p tarafına bariyeri aşan elektronlar ve p tarafından n tarafına bariyeri aşan boşluklarla sağlanır. Sonuç olarak tünel diyot klasik bir p-n eklemnin akım voltaj karakteristiğini sergiler [20]. Cam/ITO/InSe/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In, cam/ITO/InSe/coronene/In, cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIS/rubrene/In, cam/ITO/CIS/coronene/In, cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroeklemlerinde NDR etkisi görülmektedir. NDR etkisi bazı filmlerin bazı vadi pikleri bölgesinde güçlü iken bazı vadi piklerinde zayıftır. NDR yük taşıyıcı yoğunluğuna [132], güçlü bir şekilde fotoiletkenliği artıracak için sıcaklığa, kontak alanına ve kalınlığına bağlıdır [131]. Işık altında NDR etkisinin güçlenmesini Wang X. ve diğ. güçlü foto-dirence bağlamışlardır [133]. Lee K. W. ve diğ. NDR etkisinin azalmasını kontak bölgesinde vadi voltaj değerlerinde dalga fonksiyonlarının çakışmasının azalmasına bağlamışlardır [131]. Işık altında NDR etkisinin azalmasına ışığın p-n eklemelerinin enerji seviyelerindeki çakışmaları ortadan kaldırması sebep olmuştur. Lee K.W. ve diğ. grafen/Si ve türevleri ile oluşturdukları heteroeklemlerinin I-V karakterizasyonlarını farklı ışık şiddeti ve sıcaklık

altında incelemişler ve elde ettikleri heteroeklemlerin tünel diyot karakteristiğinde olduğunu, sıcaklıkla ve ışık şiddetinin değişmesiyle NDR'in değiştiğini gözlemlemişlerdir [131]. Kallol M. ve diğ. ürettikleri ITO/TiO₂/MEH-PPV/ITO ve ITO/TiO₂/ITO heteroeklemlerinin I-V karakterizasyonlarını karanlık ortamda ve farklı dalga boylu ışık altında incelemişlerdir. Karanlık ortamda ve sadece 650 nm dalga boyundaki ışık altında ITO/TiO₂/MEH-PPV/ITO heteroekleminin çok az NDR etkisini gözlemlemişlerdir. Sadece 650 nm dalga boylu ışık altında NDR etkisini görmelerini TiO₂'nin yapısal kusurlarına bağlamışlardır. ITO/TiO₂/ITO heteroeklemi hem karanlık hem de ışıklı ortamda normal diyot karakteristiği sergilediğini gözlemlemişlerdir [134]. Bizim ürettiğimiz ve karanlık ortamda NDR etkisini bariz bir şekilde gördüğümüz heteroeklemlerde ışıklı ortamda da NDR etkisi bariz bir şekilde görülmektedir. Bu da ürettiğimiz heteroeklemlerin Kallol M. ve diğ. ürettikleri heteroeklemlerden daha iyi bir alternatif olduğu anlamına gelir. Wang X. ve diğ. ürettikleri Pt/BiFeO₃/TiO₂/BiFeO₃/Pt heteroeklemlerinin karanlık ve ışıklı ortamda NDR etkisini gözlemlemişlerdir. Işık altında heteroeklemin daha güçlü NDR etkisi gösterdiğini raporlamışlardır. Ürettikleri heteroeklemlerin bu özelliğinden dolayı bellek hücreleri için alternatif malzeme olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [133]. Cam/ITO/InSe(tav)/coronene ve cam/ITO/CIGS/rubrene heteroeklemlerinde benzer durum gözlenmiştir. NDR etkisini gözlemlediğimiz cam/ITO/InSe/rubrene/In, cam/ITO/InSe(tav)/rubrene/In, cam/ITO/InSe/coronene/In, cam/ITO/InSe(tav)/coronene/In, cam/ITO/CIS/rubrene/In, cam/ITO/CIS/coronene/In, cam/ITO/CIGS/rubrene/In heteroeklemleri uygun şartlar altında frekans yükselticiler, osilatörler, refleksiyon yükselticileri, mantık anahtarları ve bellek hücreleri gibi devre elemanlarına alternatif olarak sunulabilir.

Cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In, cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In, cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroeklemleri karanlıkta ve ışık altında doğrultucu karakteristik göstermemişlerdir fakat ışık altında elektriksel iletkenliklerinde değişiklikler gözlemlenmiştir. Foto-direnç yani LDR (ışığa bağımlı direnç) ışık altında direnci değişen ve genellikle CdS ve CdSe yarıiletkenleri ile üretilen elektronik bileşenlerdir [19]. Kullanım alanları; aydınlatma sistemleri, gece ve sokak lambaları, sensörlü lamba armatürleri gibi alanlardır.

Ürettiğimiz cam/ITO/CIS(tav)/rubrene/In, cam/ITO/CIGS(tav)/rubrene/In, cam/ITO/CIGS(tav)/coronene/In heteroeklemlerinin ışık altında dirençleri değişmiştir ve tipik LDR özelliği sergilemişlerdir.

Karanlık ve ışıklı ortamda doğrultucu karakteristik gösteren heteroeklemlerin $d(v)/d(\ln(I))$ - I grafiklerinden idealite faktörleri n ve seri direnç R_s değerleri hesaplanmıştır. İdealite faktörleri karanlık ve ışıklı ortamda 2 ile 168,4 arasında değerler almışlardır. Üretilen diyotlardaki ideallikten sapmalar üretim esnasında oluşan arayüzey oksit tabakalarından, yüzey arayüzey hallerinden ve R_s etkisinden dolayıdır [135-137]. Tahsin K. ideallikten saptmaya neden olarak organik ara yüzey tabakası ile ikinci bir mekanizmanın arayüzeyde oluşmasını gösterirken [138], Fahrettin Y. tükenim bölgesinde elektron ve boşlukların rekombinasyonuna ve bir potansiyel altında kontaktaki difüzyon akımının yükselmesine atfetmişlerdir [139]. R_s değerleri karanlık ve ışıklı ortamda 1,5 k Ω ile 3356396,1 k Ω arasında değerler almışlardır.

Tavlamanın etkisi kendi grupları içinde fotovoltaiik etkinin artmasına, diyot parametrelerinin iyileşmesine sebep olmuştur. Tavlama ile diyotların idealite değerleri idelliğe yaklaşmış, R_s değerleri azalmıştır. Tüm heteroeklemlerde InSe, CIS ve CIGS ince filmlerinin tavlama ile elektriksel iletkenliği artırdığı gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi; InSe temelli heteroeklemlerde tavlama ile AFM ve SEM analizinde görüldüğü gibi pürüzlülüğün artması yani parçacık boyutun artması, EDS analizinde görüldüğü gibi elementel dağılımın değişmesi, UV-vis analizinde görüldüğü gibi yasak enerji band aralığının düşmesi, XRD analizinde pik şiddetlerinin yani kristalleşmenin artması ve fazlardaki değişim sebep olabilir. CIS temelli heteroeklemlerde EDS analizinde görüldüğü gibi elementel dağılımın değişmesi, XRD analizinde görüldüğü gibi fazlardaki değişim sebep olabilir. CIGS temelli heteroeklemlerde EDS analizinde görüldüğü gibi elementel dağılımın değişmesi, UV-vis analizinde görüldüğü gibi yasak enerji band aralığının düşmesi, XRD analizinde görüldüğü gibi fazlardaki değişim sebep olabilir.

Elde edilen heteroeklemlerin kalınlıklarının, InSe, CIS ve CIGS inorganik yarıiletkenlerinin üretim parametrelerinin (uygulama voltajı, pH, öncü çözeltilerin molariteleri vb.) ve tavlama sıcaklıklarının değiştirilmesi, farklı kontak malzemelerinin (Au, Ag vb.) kullanımı ve bu kontak malzemelerinin kalınlıklarının ve yüzey alanlarının değiştirilmesi daha verimli aygıtlar elde edilebilmesine olanak sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. ÜNAL, F., InSe İNCE FİLMLERİNİN FARKLI ALT TABANLAR ÜZERİNDE BÜYÜTÜLMESİ VE OPTİK, YAPISAL, FOTOELEKTİRİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI. 2013, KAFKAS ÜNİVERSİTESİ: TÜRKİYE.
2. MUTLU, T., Au/p-GaAs_{1-x}Px/n-GaAs YAPILI P-N EKLEM DİYOTUN TAVLANMA SICAKLIKLARINA GÖRE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI. 2010, BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ.
3. Hall, H.E., et al., Katıhal Fiziği. 2010, İSTANBUL: LİTERATÜR YAYINLARI.
4. http://hilmi.trakya.edu.tr/ders_notlari/Oto_elektronigi/Diyot_cesitleri.pdf. 27.11.2020.
5. ALKAN, Y., GaSe İNCE FİLMLERİNİN FARKLI TABANLAR ÜZERİNDE SİLAR YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI. 2012, KAFKAS ÜNİVERSİTESİ: TÜRKİYE.
6. BAL, H., Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen In₂O₃'ün Elektriksel Özellikleri, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ. 2006, ANADOLU ÜNİVERSİTESİ: TÜRKİYE.
7. Sang, N.D., et al., Effect of electrodeposition potential on composition and morphology of CIGS absorber thin film. Bulletin of Materials Science, 2013. **36**(4): p. 735-741.
8. M. Venkatachalam, M.D.K., S. Jayakumar, R. Balasundaraprabhu, N. Muthukumarasamy, Effect of annealing on the structural properties of electronbeam deposited CIGS thin films. Science Direct, 2007. **516**: p. 6848–6852.
9. Lee, H., et al., Highly dense and crystalline CuInSe₂ thin films prepared by single bath electrochemical deposition. Electrochimica Acta, 2013. **87**: p. 450-456.
10. AKMAN, E., et al., ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİ. Trakya University Journal of Engineering Sciences, 2013. **14**: p. 1-30.
11. Xu, C., et al., Growth Behavior of Pristine and Potassium Doped Coronene Thin Films on Substrates with Tuned Coupling Strength. The Journal of Physical Chemistry B, 2018. **122**(2): p. 601-611.
12. ÖZDEMİR, H.G., SPİN KAPLAMA YÖNTEMİYLE RUBRENE İNCE FİLMLERİNİN HAZIRLANMASI VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ. 2013, GİRESUN ÜNİVERSİTESİ.
13. DİKİCİ, M., KATIHAL FİZİĞİ. 2013: SEÇKİN YAYINEVİ.

14. <http://homework.uoregon.edu/pub/class/155/Canvas/semi.html>. 09.09.2019.
15. <https://studylibtr.com/doc/2358976/b%C3%B6l%C3%BCm-5>. 10.09.2019.
16. AYDOĞAN, Ş., Katıhal Fiziği. 2014: Nobel Akademik Yayıncılık.
17. <https://www.slideshare.net/bahdem/sunum-yariiletken-08112011>. 10.09.2019.
18. Hayrettin KIZILÇAOĞLU, K.G., Yavuz KÖYSAL, Amorf Hidrojenlenmiş Karbon İnce Filmlerin Yasak Enerji Bant Aralıklarının Optiksel İncelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2016. 4.
19. Özek, F., KATIHAL ELEKTRONİĞİ. 1998, ANKARA: A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları.
20. Ayşe Erol, N.B., Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. 2015.
21. Durgam Komaraiah, E.R., Y. Vijayakumar, J. Sivakumar, M. V. Ramana Reddy, R. Sayanna, Optical, Structural and Morphological Properties of Photocatalytic ZnO Thin Films Deposited by Pray Pyrolysis Technique. Modern Research in Catalysis, 2016. 5: p. 130-146.
22. UZUN, Ş., SOL-GEL YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLEN İNDİYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT FİLMLEİN ELEKTRİKSEL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ. 2012, ANKARA ÜNİVERSİTESİ: ANKARA.
23. Nalçacıgil, Z., PERYLENE TÜREVİ ORGANİK YARIİLETKEN İNCE FİLMLEİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, in Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı 2011, SELÇUK ÜNİVERSİTESİ: Konya.
24. GÖLCÜR, D., CdInTe İNCE FİLMLEİNİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ. 2012, PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ.
25. KITTEL, C., Ç.G. Öngüt, and D. Öngüt, Katı Hal Fiziğine Giriş. 2014: PALME YAYINCILIK.
26. FOX, M., Optical Properties of Solids 2001, United States by Oxford University Press Inc., New York
27. Pankove, J.I., Optical Processes in Semiconductors. 1971, New Jersey: Dover Publications.
28. Kao, K.C. and W. Huang, Electronical Transport in Solids. 1981, New York: Pergamon Press.

29. Kojima, M., et al., ELECTRONIC CONDUCTION OF TIN OXIDE THIN-FILMS PREPARED BY CHEMICAL VAPOR-DEPOSITION. *Journal of Applied Physics*, 1988. **64**(4): p. 1902-1905.
30. Yildiz, A., et al., The Thickness Effect on The Electrical Conduction Mechanism in Titanium Oxide Thin Films. *Alloys and Compounds*, 2010. **493**.
31. Brütting, W., *Physics of Organic Semiconductors*. 2005, Weinheim: Wiley-Vch-Verlag.
32. Park, B., ELECTRONIC AND STRUCTURAL PROPERTIES OF PENTACENE AT ORGANIC/INORGANIC INTERFACES in *Materials Science*. 2008, University of Wisconsin: Madison
33. Köhler, A. and H. Bässler, *Electronic Processes in Organic Semiconductors*. 2015, Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
34. KALLMANN, H. and M. Pope, Bulk Conductivity in Organic Crystals. *Nature*, 1960. **186**.
35. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/ 20.09.2019.
36. Harima, Y., K. Yamashita, and H. Suzuki, SPECTRAL SENSITIZATION IN AN ORGANIC P-N-JUNCTION PHOTOVOLTAIC CELL. *Applied Physics Letters*, 1984. **45**(10): p. 1144-1145.
37. Singh, T.B., et al., Soluble derivatives of perylene and naphthalene diimide for n-channel organic field-effect transistors. *Organic Electronics*, 2006. **7**(6): p. 480-489.
38. Rockett, A., *The Materials Science of Semiconductors* 2008, New York: Springer-Verlag.
39. Fumagalli, E.M., Growth and physical properties of crystalline rubrene. 2012, Università degli Studi di Milano-Bicocca.
40. Bergantin, S., Organic semiconductor rubrene: crystal chemistry of derivatives and high-pressure polymorphism, in *Materials Science*. 2014, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO-BICOCCA.
41. Baris, B., et al., Double barrier heights in 5,6,11,12-tetraphenylnaphthacene (rubrene) based organic Schottky diode. *Synthetic Metals*, 2013. **180**: p. 38-42.
42. Kim, K., et al., New growth method of rubrene single crystal for organic field-effect transistor. *Synthetic Metals*, 2007. **157**(10-12): p. 481-484.
43. M. Y. Chan, S.L.L., M. K. Fung, C. S. Leea), and S. T. Lee, Doping-induced efficiency enhancement in organic photovoltaic devices. *Applied Physics Letters*, 2007. **90**: p. 023504–023506.

44. Uchida, M., et al., Charge carrier trapping effect by luminescent dopant molecules in single-layer organic light emitting diodes. *Journal of Applied Physics*, 1999. **86**(3): p. 1680-1687.
45. <https://en.wikipedia.org/wiki/Rubrene>. 26.09.2019.
46. Kim, J.-S., H. Kajii, and Y. Ohmori, Characteristics of optical response in red organic light-emitting diodes using two dopant system for application to the optical link devices. *Thin Solid Films*, 2006. **499**(1): p. 343-348.
47. Vladimirov, I., et al., Energy barriers at grain boundaries dominate charge carrier transport in an electron-conductive organic semiconductor. *Sci Rep*, 2018. **8**(1): p. 14868.
48. Wong, C.Y., et al., Exciton dynamics reveal aggregates with intermolecular order at hidden interfaces in solution-cast organic semiconducting films. *Nat Commun*, 2015. **6**: p. 5946.
49. Foggatto, A.L., et al., Study of local structure at crystalline rubrene grain boundaries via scanning transmission X-ray microscopy. *Organic Electronics*, 2019. **74**: p. 315-320.
50. Barış, B., Frequency dependent capacitance and conductance properties of Schottky diode based on rubrene organic semiconductor. *Physica B: Condensed Matter*, 2013. **426**: p. 132-136.
51. Rudiono, F. Kaneko, and M. Takeuchi, Morphological characteristics of perylene-doped phthalocyanine thin films and their photovoltaic effect. *Applied Surface Science*, 1999. **142**(1): p. 598-602.
52. Chan, M.Y., et al., Erratum: "Doping-induced efficiency enhancement in organic photovoltaic devices" [*Appl. Phys. Lett.* 90, 023504 (2007)]. *Applied Physics Letters*, 2007. **91**(8).
53. Liu, Z., et al., Effects of rubrene mixing on the electronic structures of donor/acceptor interface in organic photovoltaic device. *Applied Surface Science*, 2011. **257**(20): p. 8462-8464.
54. Sinha, S. and M. Mukherjee, Thickness dependent electronic structure and morphology of rubrene thin films on metal, semiconductor, and dielectric substrates. *Journal of Applied Physics*, 2013. **114**(4).
55. Roth, F., et al., Electronic structure of undoped and potassium-doped coronene investigated by electron energy-loss spectroscopy. *Physical Review B*, 2012. **85**(1).
56. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/9115>. 03.10.2019.
57. <https://en.wikipedia.org/wiki/Coronene> 11.11.2019.

58. <https://www.graphene-info.com/coronene-secret-low-cost-graphene-cvd-synthesis>. 03.10.2019.
59. Tang, C.W. and S.V. Slyke, *Inorganic and Organic Electroluminescence*. 1996.
60. Yuji Hamada, et al., Influence of the Emission Site on the Running Durability of Organic Electroluminescent Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995. **34**.
61. Chishio Hosokawa, et al., Highly efficient blue electroluminescence from a distyrylarylene emitting layer with a new dopant. *Applied Physics Letters*, 1995. **67**(26).
62. Zhang, R., H. Zheng, and J. Shen, Blue light-emitting diodes based on coronene-doped polymers. *Synthetic Metals*, 1999. **105**(1): p. 49-53.
63. Li, Q., et al., Structure-property relationships of coronene in external electric field. *Organic Electronics*, 2018. **59**: p. 196-201.
64. Barış, B., S. Karadeniz, and M.O. Erdal, Preparation of coronene nanowires and its properties. *Materials Letters*, 2017. **205**: p. 70-74.
65. <https://www.makaleler.com/bakir-nedir-nerelerde-kullanilir>. 09.11.2019.
66. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Bak%C4%B1r>. 09.11.2019.
67. <https://www.makaleler.com/indiyum-nedir-ozellikleri-kullanimi> 09.11.2019.
68. <https://www.makaleler.com/galyum-nedir-ozellikleri-kullanimi>. 09.11.2019.
69. <https://www.makaleler.com/selenyum-nedir-ozellikleri-faydalari-zararlari>. 10.11.2019.
70. Choi, I.H. and P.Y. Yu, Properties of phase-pure InSe films prepared by metalorganic chemical vapor deposition with a single-source precursor. *Journal of Applied Physics*, 2003. **93**(8): p. 4673-4677.
71. Pathan, H.M., et al., Preparation and characterization of indium selenide thin films from a chemical route. *Materials Chemistry and Physics*, 2005. **93**(1): p. 16-20.
72. Gopal, S., et al., Preparation and characterization of electrodeposited indium selenide thin films. *Crystal Research and Technology*, 2005. **40**(6): p. 557-562.
73. Gopal, S., et al., Conduction studies on electrodeposited indium selenide thin films. *Ionics*, 2004. **10**(3-4): p. 300-303.
74. Kobbi, B., D. Ouadjaout, and N. Kesri, Growth and characterization of In-Se films. *Vacuum*, 2001. **62**(4): p. 321-324.
75. A.E.-H.B. Kashyout, E.-Z.A., T. Meaz, M. Nabil , M. Amer, (One-step) electrochemical deposition and characterization of CuInSe₂ thin films. *Alexandria Engineering Journal*, 2014. **53**: p. 731-736.

76. Liu, F.Y., et al., Composition and Morphology of Electrodeposited CuInSe₂ Precursor Films. *Journal of Materials Science & Technology*, 2009. **25**(2): p. 242-246.
77. R.H. Bari, L.A.P., P.P. Patil, Studies on chemically deposited nonstoichiometric thin films of CuInSe₂—a highly promising material for photosensors. *Sensors & Transducers Journal*, 2006. **69**(7).
78. Murat KALELİ, C.A.Y., Murat KOÇ, Salih AKYÜREKLİ, A. Buğrahan BAYRAM, Termal Buharlaştırma Yöntemiyle Hazırlanan Ga Katkılı CuInSe₂ İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 2017. **12**: p. 19-32.
79. Sene, C., et al., CuIn (Se, S)₂ based photovoltaic cells from one-step electrodeposition. *International Journal of the Physical Sciences*, 2009. **4**(10): p. 562-570.
80. Liu, F.Y., et al., Pulse-plating electrodeposition and annealing treatment of CuInSe₂ films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008. **18**(4): p. 884-889.
81. Kois, J., et al., Glass/ITO/In(O,S)/CuIn(S,Se)₂ solar cell with conductive polymer window layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005. **87**(1): p. 657-665.
82. Bereznev, S., et al., Polypyrrole electrodeposition on inorganic semiconductors CuInSe₂ and CuInS₂ for photovoltaic applications. *Macromolecular Symposia*, 2004. **212**(1): p. 287-292.
83. MIZRAK, A.V., İNCE FİLM CIGSe YÜZEYLERİNİN NaF BİRİKTİRME SONRASI FOTOSPEKTROSKOPİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği. 2017, SAKARYA ÜNİVERSİTESİ.
84. R.N. Bhattacharya, et al., 15.4% CuIn_{1-x}Ga_xSe₂-Based Photovoltaic Cells from Solution-Based Precursor Films. *NREL/CP*, 1999. **590**: p. 26611.
85. Yildirim, H. and A. Peksoz, Characterization of non-vacuum CuIn_xGa_{1-x}Se₂ thin films prepared by low-cost sequential electrodeposition technique. *Thin Solid Films*, 2017. **631**: p. 34-40.
86. Oliver H. Seeck and B.M. Murphy, X-Ray Diffraction: Modern Experimental Techniques. 2014: *Journal of Chemical Information and Modeling*. 414.
87. YAVRU, C.A., Cu(InGa)Se₂ (CIGS) İNCE FİMLERİN TERMAL BUHARLAŞTIRMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ FİZİK ANABİLİM DALI. 2018, SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ: ISPARTA.
88. <https://neu.edu.tr/wp-content/uploads/2015/11/BMT-211-ders-notu-X-Isinlari.pdf>. 26.04.2020.

89. Patrick, E., Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. 2009, New York: Springer. 330.
90. <https://www.slideshare.net/ErayEmrem/elektron-mikroskopuna-genel-bak> 27.04.2020.
91. ŞAHİN, R., ÇOKLU FREKANSLI ATOMİK KUVVET MİKROSKOBU VE UYGULAMALARI, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ Fizik Mühendisliği. 2009, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ: İSTANBUL.
92. G.Binnig, C.F. Quate, and C. Gerber, Atomic ForceMicroscope. PHYSICAL REVIEW LETTERS, 1986. **56**.
93. Hembacher, S., et al., Revealing the hidden atom in graphite by low-temperature atomic force microscopy. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003. **100**(22): p. 12539-12542.
94. ÖZTOP, E., FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE KAPLANAN POLİMER MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ, in FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ KİMYA MÜHENDİSLİĞİ. 2006, İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ: İSTANBUL.
95. Martin, P.M., Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. 1994, New Jersey: Noyes Publication.
96. Mattox, D.M., Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 1998, New Jersey: Noyes Publication.
97. <https://www.lesker.com>. 03.06.2020.
98. <https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri/> 03.06.2020.
99. SARIKAYA, Y., FİZİKOKİMYA. 2017: Gazi Kitabevi.
100. KÖSE, N.U., MUHTELİF METAL KATKILI VE KATKISIZ ZnO YAPILARIN ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA İLE ÜRETİMİ VE BU YAPILARIN ORGANİK GÜNEŞ PİLLERİNDE KULLANIMI, in MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, FİZİK ANABİLİM DALI. 2014, GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ: GEBZE.
101. Lee, J. and Y. Tak, Electrodeposition of ZnO on ITO Electrode by Potential Modulation Method. Electrochemical and Solid State Letters,, 2001. **4**.
102. Lincot, D., Electrodeposition of semiconductors. Thin Solid Films, 2005. **487**(1-2): p. 40-48.
103. <https://www.metrohm.com/tr-tr/urunler/elektrokimya/autolab-moduler-urun-ailesi/PGSTAT128N> 25.12.2019.
104. <http://grumlab.giresun.edu.tr/tr/page/elektrik-manyetik-ve-optik-ozellikler-olcum-laboratuvari/4288> 25.12.2019.

105. <https://www.ankaanalitik.com.tr/europe-600-benchtop-x-ray-diffractometer>. 30.06.2020.
106. <http://odumaral.odu.edu.tr/files/other/Cihazlar/SEM.pdf>. 30.06.2020.
107. http://www.terralab.com.tr/docs/nanosurf/nanosurf_flex-axiom_brochure.pdf. 30.06.2020.
108. <http://grumlab.giresun.edu.tr/tr/page/spektrofotometre-laboratuvari/4289>. 30.06.2020.
109. <http://www.rotalab.com/tr/urunler/gunes-simulatorleri/kucuk-alan-solar-simulator.html>. 30.06.2020.
110. Madugu, M.L., et al., Preparation of indium selenide thin film by electrochemical technique. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2014. **25**(9): p. 3977-3983.
111. Sreekumar, R., et al., SHI induced single-phase InSe formation at lower annealing temperature. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2006. **244**(1): p. 190-193.
112. Taylor, W.H., X-Ray Measurements on Diflavylene, Rubrene, and Related Compounds. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials* 1936. **93**(1).
113. Matsukawa, T., et al., Polymorphs of Rubrene Crystal Grown from Solution. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010. **49**(8): p. 8R.
114. D. E. Henn, W. G. Williams, and D.J. Gibbons, Crystallographic data for an orthorhombic form of rubrene. *Journal of Applied Crystallography*, 1971. **4**.
115. https://en.wikipedia.org/wiki/Rubrene#cite_note-%206. 17.03.2020.
116. Xiao, J.C., et al., Preparation, characterization, and photoswitching/light-emitting behaviors of coronene nanowires. *Journal of Materials Chemistry*, 2011. **21**(5): p. 1423-1427.
117. Talyzin, A.V., et al., Coronene Fusion by Heat Treatment: Road to Nanographenes. *Journal of Physical Chemistry C*, 2011. **115**(27): p. 13207-13214.
118. Boolchandani, S., S. Srivastava, and Y.K. Vijay, Preparation of InSe Thin Films by Thermal Evaporation Method and Their Characterization: Structural, Optical, and Thermoelectrical Properties. *Journal of Nanotechnology*, 2018. **2018**: p. 9380573.
119. Ornelas, R.E., et al., In₆Se₇ thin films by heating thermally evaporated indium and chemical bath deposited selenium multilayers. *Applied Surface Science*, 2012. **258**(15): p. 5753-5758.

120. Cha, J.-H., et al., Complexing agent-assisted highly dense CuInSe₂ thin films prepared by one-step electrochemical deposition. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018. **808**: p. 211-217.
121. Lee, S., et al., Effect of annealing treatment on CdS/CIGS thin film solar cells depending on different CdS deposition temperatures. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015. **141**: p. 299-308.
122. Zhang, C.H., et al., Cyano- and chloro-substituted coronene diimides as solution-processable electron-transporting semiconductors. *Chemical Communications*, 2015. **51**(33): p. 7144-7147.
123. Matheswaran, P., R. Saravana Kumar, and R. Sathyamoorthy, Effect of annealing on the structural and optical properties of InSe bilayer thin films. *Vacuum*, 2011. **85**(8): p. 820-826.
124. ASTAM, A., 'InSe İnce Filmlerin Silar Yöntemiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, in Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı. 2006, Atatürk Üniversitesi, : ERZURUM.
125. Songül FİAT VAROL, et al., OPTICAL, STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF CuIn_{0.7}Ga_{0.3}(Se_{0.6}Te_{0.4})₂ THIN FILMS UNDER DIFFERENT ANNEALING TEMPERATURES. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 2013. **9**: p. 9-16.
126. M. A. S. Bhuiyan, et al., A Study on the Optical Properties of Co-evaporated CuInSe₂ Thin Films for High Efficiency Inorganic Solar Cell. *International Journal of Integrated Sciences & Technology* 2018. **3**: p. 11-15.
127. <https://diyot.net/foto-diyot/>. 29.12.2020.
128. Nezir YILDIRIM, E.D., Ag/Azure A /n-Si Schottky Diyodun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerinin araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 2017. **6**(1).
129. Wu, X., et al., Ferroelectric enhanced photoelectrochemical water splitting in BiFeO₃/TiO₂ composite photoanode. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019. **783**: p. 643-651.
130. https://tr.qaz.wiki/wiki/Negative_resistance#Types_and_terminology. 29.12.2020.
131. Lee, K.W., et al., Light-induced negative differential resistance in graphene/Si-quantum-dot tunneling diodes. *Sci Rep*, 2016. **6**: p. 30669.
132. Makoto Hosoda, H.M., Koji Tominaga, Influence of G–X mixing on carrier transport and photoluminescence in GaAs/AlAs type-I superlattices. *Superlattices and Microstructures*, 1998. **23**.
133. Wang, X., et al., Light-induced negative differential resistance effect in a resistive switching memory device. *Current Applied Physics*, 2020. **20**(3): p. 371-378.

134. Mohanta, K., M. Karthega, and S.K. Batabyal, Light-dependent negative differential resistance in MEH-PPV decorated electrospun TiO₂ mat. *Applied Physics A*, 2018. **124**(4).
135. Simon M. Sze, K.K.N., *Physics of Semiconductor Devices THIRD EDITION*. 2006: John Wiley & Sons.
136. Emlyn H. Rhoderick, E.H.R., R. H. Williams, *Metal-semiconductor Contacts*. 1988, Oxford: Clarendon Press.
137. GÜLLÜ, Ö., Al/Nigrosin/p-Si Yapıların Fabrikasyonu ve Temel Diyot Parametrelerinin Hesaplanması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 2018. **9**: p. 689-700.
138. Kılıçoğlu, T., Effect of an organic compound (Methyl Red) interfacial layer on the calculation of characteristic parameters of an Al/Methyl Red/p-Si sandwich Schottky barrier diode. *Thin Solid Films*, 2008. **516**(6): p. 967-970.
139. Yakuphanoglu, F., Photovoltaic properties of hybrid organic/inorganic semiconductor photodiode. *Synthetic Metals*, 2007. **157**(21): p. 859-862.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : FATİH ÜNAL
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.07.1987 KAĞIZMAN
E-posta : fatih.unal@giresun.edu.tr, fatih.unal3636@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010 İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ FEN EDEBİYAT FAKÜLTESİ FİZİK BÖLÜMÜ
- **Yüksek Lisans** : 2013 KAFKAS ÜNİVERSİTESİ FİZİK ANABİLİM DALI TEZLİ YÜKSEK LİSANS
- **Doktora** :

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014 - Giresun Üniversitesinde çalışıyor (halen).

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaller, Bildiriler, Patentler v.b.)

- **Ünal, F., İzgi, T., Barış, B., Karadeniz S.** (2020) Cam/ITO/CIS/Rubrene Heteroekleminin Yüzey ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 2020