

Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Volkan Şenay

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Ağustos 2016

Preparation of Doped and Undoped GaAs Thin Films
and Investigation of Their Some Properties

Volkan Şenay

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

August 2016

Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Volkan Şenay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Genel Fizik Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Suat Pat

Bu tez çalışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu tarafından desteklenmiştir. Proje No: 201619A217

Ağustos 2016

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Volkan ŞENAY'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Suat PAT

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Suat PAT

Üye : Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK

Üye : Doç. Dr. Metin KUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÖZBAŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Suat PAT danışmanlığında hazırlamış olduğum “Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 29/08/2016

Volkan ŞENAY

İmza

ÖZET

Bu çalışmada katkısız GaAs ile Co, Al, In, C, Si ve Ge safsızlıkları katkılanmış GaAs ince filmler cam alttaşlar üzerine termiyonik vakum ark tekniği ile biriktirilmiştir. Üretilen filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel, bileşimsel ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. XRD sonuçları, filmlerin tümünün polikristal yapıda olduğunu ve kristal boyutlarının 25 ile 34 nm arasında değiştiğini göstermiştir. Spektroskopik yansıma ölçümü sonuçlarına göre film kalınlıkları 80 ile 1800 nm arasındadır. Filmlerin birikme hızları ise 1,33 ile 13,33 nm/s arasında değişmektedir. Bu hızlar diğer ince film biriktirme tekniklerine kıyasla yüksek olup bu durum TVA'nın oldukça hızlı bir teknik olduğunu ortaya koymaktadır. Yansıma değerleri incelendiğinde filmlerin kısa dalgalı boylarında düşük yansımaya sahip oldukları ve uzun dalgalı boylarına gidildikçe yani düşük foton enerjilerinde yansımanın arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte kırılma indislerinin artan dalgalı boyu ile birlikte azaldığı görülmüştür. Ayrıca, Co ve Al katkılamanın kırılma indisini azalttığı, In, C, Si ve Ge katkılamanın ise kırılma indisini arttırdığı bulunmuştur. $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişim grafiklerinden tüm filmlerin doğrudan bant geçişli oldukları ve yasak enerji aralıklarının 0,96 ile 1,62 eV arasında değiştiği bulunmuştur. In ve Si katkılamanın yasak enerji aralığını azalttığı, Co, Al, C ve Ge katkılamanın ise yasak enerji aralığını arttırdığı bulunmuştur. Katkısız GaAs ve Co, In, C, Si katkılanmış GaAs filmlerin n-tipi yarıiletkenler olduğu belirlenmiştir. Al ve Ge katkılanmış GaAs filmlerin ise p-tipi olduğu anlaşılmıştır. FESEM sonuçları, tüm alttaşların tamamen filmler ile kaplandığını göstermektedir. EDX sonuçları, beklenen galyum, arsenik ve eklenen safsızlık atomlarının filmlerdeki varlığını doğrulamıştır. AFM sonuçları, katkısız GaAs ile Al ve In katkılanmış GaAs film yüzeylerinin yuvarlak tanelerden oluştuğunu göstermektedir. Co, C ve Si katkılanmış film yüzeyleri ise tabandan yukarıya doğru sivrilerek büyüyen tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca, Ge katkılanmış film yüzeyinin diğer filmlere kıyasla çok daha pürüzsüz olduğu görülmüştür. Bu gözlem, UV/VIS/NIR spektroskopi ve FESEM çalışmalarından elde edilen sonuçlarla da desteklenmektedir. Akım-voltaj ölçümlerinin sonuçlarına göre, üretilen filmlerin öz dirençleri $1,32 \times 10^{-1}$ ile $4,85 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ arasındadır. Hall ölçümü sonuçlarına göre ise filmlerin taşıyıcı yoğunlukları $1,49 \times 10^{15}$ ile $8,03 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ arasında olup mobiliteleri ise $6,21 \times 10^2$ ile $1,47 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$ arasındadır.

Anahtar Kelimeler: GaAs; optik özellikler; elektriksel özellikler; XRD; FESEM; AFM.

SUMMARY

In this study, undoped GaAs and Co, Al, In, C, Si, Ge doped GaAs thin films were deposited on glass substrates by thermionic vacuum arc technique. Structural, optical, morphological, compositional and electrical properties of the produced films were examined. XRD results showed that the entirety of the films had a polycrystalline structure and their crystallite sizes varied between 25 nm and 34 nm. The film thicknesses varied between 80 and 1800 nm based on the spectroscopic reflectometry results. The deposition rates of the films varied between 1,33 to 13,33 nm/sec. These rates were higher in comparison to other thin film deposition techniques and this situation showed that TVA was a quite rapid technique. Considering the reflectance values, it was seen that the films had low reflectance at short wavelengths and at long wavelengths, namely at low photon energies, the reflectance increased. Nevertheless, it was seen that refractive indices decreased in parallel to increased wavelength. Moreover, it was found that Co and Al doping decreased the refractive index, and In, C, Si, Ge doping increased the refractive index. From the graph of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$, it was found based on the variation graphs that all films had direct band gaps and the band gaps varied between 0,96 to 1,62 eV. In and Si doping decreased the band gaps and Co, Al, C and Ge doping increased the band gaps. Undoped GaAs and Co, In, C, Si doped GaAs films were found to be n-type semiconductors. On the other hand, Al and Ge doped GaAs films were p-type. FESEM results showed that all substrates were deposited with the films completely. EDX results verified the presence of the expected gallium and arsenic and the added impurity atoms in the films. AFM results showed that undoped GaAs and Al and In doped GaAs film surfaces were composed of spherical grains. Co, C and Si doped film surfaces were composed of grains growing as sharpening from the base upwards. Moreover, it was seen that Ge doped film surface was much smoother in comparison to other films. This observation supported the results obtained by UV/VIS/NIR spectroscopy and FESEM studies as well. Based on the current-voltage measurements, the resistivity of the manufactured films ranged between $1,32 \times 10^{-1}$ to $4,85 \times 10^4$ Ωcm . Based on Hall measurement results, the carrier concentrations of the films were between $1,49 \times 10^{15}$ to $8,03 \times 10^{17}$ cm^{-3} and their mobility were between $6,21 \times 10^2$ to $1,47 \times 10^6$ cm^2/Vs .

Key Words: GaAs; optical properties; electrical properties; XRD; FESEM; AFM.

TEŞEKKÜR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora Tezi olarak sunduğum bu çalışma Sayın Doç. Dr. Suat PAT danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren, bilimsel ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Suat PAT'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, engin bilgilerinden istifade ettiğim ve her zaman manevi desteklerini hissettiğim değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ'a çok teşekkür ederim.

Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Laboratuvarında UV/VIS/NIR Spektroskopi analizlerinin gerçekleştirilmesi konusunda yardımcı olan Sayın Doç. Dr. A. Şenol AYBEK'e ve Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü Kristal Büyütme Laboratuvarında akım-voltaj ölçümleri ile Hall Etkisi ölçümlerinin gerçekleştirilmesi konusunda yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya ilgi ve destekleri için çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında hiçbir desteğini esirgemeyerek her zaman bana yardımcı olan çok değerli arkadaşım Soner ÖZEN'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Hiçbir zaman sevgisini ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Burcu AYDEMİR ŞENAY'a ve bu günlere gelmemizde çok emekleri olan, güvenen ve dualarını esirgemeyen ailelerimize minnet duygularımı bildiririm.

Bu tez çalışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 201619A217).

Volkan ŞENAY

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kristal Yapılar	1
1.2. Yarıiletkenler	5
1.2.1. III-V yarıiletkenler	6
1.2.1.1. <u>Galyum arsenik bileşiğinin bazı fiziksel özellikleri</u>	7
1.2.1.2. <u>AlGaAs ve InGaAs alaşımlarının bant aralıkları</u>	12
1.3. İnce Film	13
1.4. İnce Film Üretim Teknikleri	13
1.4.1. Fiziksel buhar biriktirme	14
1.5. Çalışmanın Konusu	16
1.6. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi	16
2. YARIİLETKENLER	17
2.1. Katıların Bant Teorisi	18
2.1.1. Katılarda enerji bantlarının oluşumu	18
2.1.2. Katıların bant yapısı	20
2.2. Yarıiletken Tipleri	21
2.2.1. Has yarıiletkenler	21
2.2.2. Katkılı yarıiletkenler	23
2.2.2.1. <u>n- tipi yarıiletkenler</u>	23
2.2.2.2. <u>p-tipi yarıiletkenler</u>	25
2.3. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri	26
2.3.1. Yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.3.2. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik ve öz direnç	31
2.4. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri	33
2.4.1. Yarıiletkenlerde soğurma olayları	37
2.4.1.1. <u>Temel soğurma olayı</u>	38
2.4.1.2. <u>Eksitonlar tarafından soğurma olayı</u>	42
2.4.1.3. <u>Serbest yük taşıyıcıları tarafından soğurma olayı</u>	43
2.4.1.4. <u>Katkı atomları tarafından soğurma olayı</u>	43
3. VAKUMDA İNCE FİLM ÜRETİM TEKNİKLERİ	44
3.1. Termal Buharlaştırma Tekniği	45
3.1.1. Rezistans ile buharlaştırma	46
3.1.2. İndüksiyon akımı ile buharlaştırma	46
3.1.3. Elektron demeti ile buharlaştırma	46
3.1.4. Lazer ile buharlaştırma	47
3.1.5. Katodik ark ile buharlaştırma	48
3.1.6. Moleküler demet epitaksi tekniği	48
3.2. Sıçratma Tekniği	50
3.2.1. Diyot sıçratma tekniği	51
3.2.2. Triyot sıçratma tekniği	53
3.2.3. Manyetik alanda sıçratma tekniği	53
3.2.4. Reaktif sıçratma tekniği	55
3.2.5. İyon demeti ile sıçratma tekniği	56
4. TERMİYONİK VAKUM ARK	57
4.1. TVA’da Elektrotların Düzenlenişi	59
4.2. TVA Tekniği ile İnce Film Üretimi	60
4.3. İnce Film Üretiminde TVA Tekniğinin Avantajları	61
4.4. TVA Sisteminin Bileşenleri	61
4.4.1. Vakum odası	62
4.4.2. Anot	62
4.4.3. Katot	63

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.4.4. Katot akımı ve anot potansiyeli güç kaynakları	65
4.4.5. Vakumlama sistemi	66
4.4.6. Basınç ölçüm sistemi	66
4.4.7. Ampermetreler ve voltmetreler sistemi	67
4.4.8. İnce film kalınlık kontrol cihazı	67
4.4.9. Soğutma sistemi.....	67
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
5.1. Katkılı ve Katkısız GaAs ince Filmlerin Üretimi.....	68
5.1.1. Üretim parametreleri	68
5.2. Üretilen Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Karakterizasyonu	69
5.2.1. X-ışını kırınımı (XRD)	70
5.2.2. Spektroskopik yansıma ölçümü.....	73
5.2.3. UV/VIS/NIR spektroskopi ve yasak enerji aralığının belirlenmesi	74
5.2.4. Sıcak uç metodu	76
5.2.5. FESEM ve EDS.....	77
5.2.6. Atomik kuvvet mikroskobu analizi	79
5.2.7. İki uç tekniği.....	83
5.2.8. Hall etkisi ölçümü.....	84
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	90
6.1. XRD Çalışmaları.....	90
6.2. Spektroskopik Yansıma Ölçümü Çalışmaları	97
6.3. UV/VIS/NIR Spektroskopi Çalışmaları ve Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi	104
6.4. İletkenlik Tipinin Belirlenmesi	117
6.5. FESEM ve EDS Çalışmaları	118
6.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu Çalışmaları.....	128
6.7. İki Uç Tekniği ve Hall Etkisi Ölçümü Sonuçları	134
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	149
ÖZGEÇMİŞ	163

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bir basit örgü ve bu örgüye ait birim hücre	1
1.2. Basit örgü, taban merkezli örgü, hacim merkezli örgü ve yüzey merkezli örgü	2
1.3. Bravais örgüleri	3
1.4. Kübik kristallerde bazı düzlemler ve bu düzlemlerin Miller indisleri	4
1.5. III-V yarıiletken bileşik ve alaşımlar	6
1.6. ZnS ve GaAs kristalinin birim hücresi	7
1.7. GaAs için enerji-bant diyagramı	8
1.8. Si ve GaAs için enerji-bant yapıları	9
1.9. Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi	10
1.10. Bazı önemli yarıiletkenlerin örgü sabitleri ve bant aralıkları	12
1.11. Fiziksel buhar biriktirme tekniği	14
1.12. Çekirdek büyüme modelleri	15
2.1. Sodyum atomuna ait elektron enerji seviyeleri	18
2.2. Çok sayıda sodyum atomu bir araya geldiğinde 3s bandının meydana gelişi	19
2.3. Bir yarıiletkenin mutlak sıfır sıcaklığında basit bant yapısı	20
2.4. Enerji bant teoremine göre yalıtkan, yarıiletken ve iletken gösterimi	21
2.5. Has yarıiletkenin farklı sıcaklıklardaki iletim ve valans bandı	22
2.6. Saf germanyum yapısı ve katı germanyum içine arseniğin katkılanması	24
2.7. Bir yarıiletkende donör enerji seviyesi	24
2.8. Galyum katkılanmış germanyum kristali	25
2.9. Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi	26
2.10. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu	27
2.11. Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda iletim ve valans bantları ve dağılım fonksiyonu ile iletim ve valans bantlarındaki durum yoğunlukları	28
2.12. Has yarıiletkenlerde $m_e^* = m_h^*$ olduğunda Fermi enerji seviyesi	31
2.13. Malzemeye dik gelen ışığın soğurulma, geçirilme ve yansımaları	35
2.14. Yarıiletkenlerde soğurma spektrumu	38
2.15. Bir yarıiletkende direkt bant geçişi	39
2.16. Bir yarıiletkende indirekt bant geçişi	41
2.17. Eksitonlar tarafından soğurma olayı	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.18. Serbest taşıyıcılar tarafından soğurma olayı.....	43
3.1. Genel termal buharlaştırma mekanizması.....	45
3.2. Elektron demeti ile termal buharlaştırma sisteminin şeması	47
3.3. Moleküler demet epitaksi sisteminin şeması	49
3.4. Fiziksel sıçratma olayı	50
3.5. DC diyot sıçratma sistemi.....	52
3.6. RF diyot sıçratma sistemi	52
3.7. Triyot sıçratma sistemi.....	53
3.8. Dairesel düzenli manyetik alan şekli ve hareket yolu.....	54
3.9. Dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniklerinde plazma kapanmasının karşılaştırılması.....	55
3.10. İyon demeti ile sıçratma yöntemi.....	56
4.1. Bazı element ve bileşiklerin TVA tekniği ile oluşturulan plazmaları.....	58
4.2. TVA'nın elektrotlarının düzenlenişi.....	59
4.3. TVA tekniği ile ince film üretimi	60
4.4. Çalışmada kullanılan TVA sisteminin fotoğrafı.....	61
4.5. TVA sisteminde kullanılan tungsten bir pota	63
4.6. 0,5 mm çaplı tungsten telden hazırlanmış el yapımı filaman	63
4.7. İçinde katot filamanı bulunan elektron tabancasının önden görünüşü	64
4.8. Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı panosu	65
4.9. Vakumlama sistemi oluşturan mekanik pompa ve difüzyon pompası.....	66
4.10. Ampermetreler ve voltmetreler sistemi	67
5.1. Monokromatik X-ışınlarının atomik düzlemlerden yansıması	70
5.2. FILMeasure yazılımının ana ekranı	74
5.3. $(\alpha h\nu)^n$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi	75
5.4. Taramalı elektron mikroskopunun şematik diyagramı	77
5.5. Atomik kuvvet mikroskopunun manivelasının ve sivri ucunun 1000 kez ve 3000 kez büyütülmüş elektron mikroskobu görüntüleri.....	79
5.6. Atomik kuvvet mikroskopunda temel görüntü alma mekanizması	80
5.7. Uç-numune arasındaki kuvvetin mesafe ile değişimi	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.8. Negatif skewness, pozitif skewness, negatif kurtosis ve pozitif kurtosis.	82
5.9. İki uç tekniğinin şematik gösterimi	83
5.10. Hall etkisi olayının şematik diyagramı	84
5.11. Hall ölçümünde kullanılan örnek geometrileri	87
5.12. Van der Pauw tekniği ile Hall voltajı ölçümünün şematik gösterimi	88
5.13. Van der Pauw tekniği kullanarak direnç ölçümünün şematik gösterimi	88
5.14. Hall ölçümünde kullanılan geometri.....	89
6.1. Üretilen GaAs ince filmin XRD deseni	90
6.2. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin XRD deseni	91
6.3. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin XRD deseni.....	92
6.4. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin XRD deseni.....	93
6.5. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin XRD deseni	94
6.6. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin XRD deseni.....	95
6.7. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin XRD deseni	96
6.8. Üretilen GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları ..	97
6.9. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	98
6.10. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	99
6.11. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	100
6.12. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	101
6.13. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	102
6.14. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları	103
6.15. Üretilen GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	104
6.16. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	105
6.17. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.....	106
6.18. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	107

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.19. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	108
6.20. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	109
6.21. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları	110
6.22. Üretilen GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	111
6.23. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	112
6.24. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği	113
6.25. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	114
6.26. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	115
6.27. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	116
6.28. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ -hv grafiği.....	117
6.29. Üretilen GaAs ince filmin 10000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü	118
6.30. Üretilen GaAs ince filmin EDS spektrumu	119
6.31. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin 70000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü....	119
6.32. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu	120
6.33. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin 50000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü	121
6.34. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu	121
6.35. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin 10000, 50000 ve 100000 kez büyütülmüş FESEM görüntüleri.....	122
6.36. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.....	123
6.37. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin 70000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü.....	123
6.38. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu	124
6.39. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin 60000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü.....	125
6.40. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.....	126
6.41. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin 50000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü....	126
6.42. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu	127
6.43. Üretilen GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü	128
6.44. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü	129
6.45. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü.....	130
6.46. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü.....	131
6.47. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü	132

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.48. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü.....	133
6.49. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü	134
6.50. Üretilen GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.....	135
6.51. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.....	136
6.52. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.....	137
6.53. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği	138
6.54. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.....	139
6.55. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği	140
6.56. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.....	141

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Üç boyutta kristal sistemleri	2
1.2. GaAs bileşiğinin oda sıcaklığındaki temel bazı fiziksel özellikleri.....	11
5.1. Anot potasına koyulan kaynak malzemeleri ve miktarları	69
5.2. Üretim parametreleri	69
6.1. Üretilen filmlerin bazı fiziksel özellikleri.....	144



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Amper
A	Optik soğurma
Å	Angström
AC	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AH	Ortalama yükseklik
Al	Alüminyum
AlAs	Alüminyum arsenik
AlGaAs	Alüminyum galyum arsenik
AR-GE	Araştırma ve geliştirme
As	Arsenik
B	Bor
B	Manyetik alan
c	Işık hızı
C	Karbon
C	Taban merkezli örgü
°C	Santigrat derece
C ₂ H ₂	Asetilen
CdS	Kadmiyum sülfür
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cu	Bakır
d	TVA’da anotla katot arasındaki uzaklık
d	XRD’de paralel düzlemler arasındaki mesafe
D	Ortalama tanecik büyüklüğü
DC	Doğru akım
E	Elektrik alan
E _a	Akseptör atomlarının enerji seviyesi
E _c	İletkenlik bandının taban enerji seviyesi
E _d	Donör atomlarının enerji seviyesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

EDS	Enerji dağılımı spektrometresi
E_{eks}	Eksitonun bağlanma enerjisi
E_f	Elektronun son enerjisi
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_i	Elektronun ilk enerjisi
E_p	Fonon enerjisi
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
E_v	Valans bandının tavan enerji seviyesi
eV	Elektron volt
F	Yüzey merkezli örgü
FBB	Fiziksel buhar biriktirme
FESEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
g	Gram
Ga	Galyum
GaAs	Galyum arsenik
GaP	Galyum fosfat
Ge	Germanyum
GOF	Goodness of fit
GΩ	Gigaohm
h	Planck sabiti
I	Cisim merkezli örgü
I	Malzemeyi geçen ışık şiddeti
I_0	Malzemeye gelen ışık şiddeti
I_D	TVA'da anot ve katot arasında oluşan deşarj akımı
I_f	TVA'da katot filamanı ısıtma akımı
In	İndiyum
InAs	İndiyum arsenik
InSb	İndiyum antimon
j	Akım yoğunluğu
JCPDS	Toz kırınım standartları komitesi birliği

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

k	Boltzman sabiti
k	Sönüm katsayısı
K	Kelvin
KBB	Kimyasal buhar biriktirme
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kΩ	Kiloohm
l	İki uç tekniğinde kontak uzunluğu
L	İki uç tekniğinde metal kontaklar arası mesafe
MBE	Molecular beam epitaxy
m_e	Elektronların kütlesi
Mg	Magnezyum
MgF ₂	Magnezyum florür
m_h	Hollerin kütlesi
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
n	Birim hacimdeki elektronların sayısı
$\tilde{n}$	Kompleks kırılma indisi
N	Nitrojen
n_0	Elektron yoğunluğu
n_0	Kırılma indisinin gerçel kısmı
Nc	İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
nm	Nanometre
Nv	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
P	Basit örgü
P	Fosfor
P	TVA'da basınç
p_0	Hol yoğunluğu
PbS	Kurşun sülfür
PMT	Fotoçoğaltıcı tüp
q	Elektrik yükü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

$q\chi$	Elektron ilgisi
R	Yansıma
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
RF	Radyo frekans
R_H	Hall sabiti
RHEED	Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı
RMS	Ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü
Sb	Antimon
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Si	Silisyum
SiAs	Silisyum arsenik
SiGe	Silisyum germanyum
Skr	Kurtosis
s	Saniye
Ssk	Skewness
t	Film kalınlığı
t	TVA'da işlem süresi
T	Optik geçirgenlik
TVA	Termiyonik vakum ark
UV/VIS/NIR	Morötesi/Görünür/Yakın kızılötesi
v	Elektrik yükünün hızı
V	Volt
V_B	TVA'da ateşleme voltajı
vb	ve benzeri
V_D	TVA'da ark ateşlendikten sonra elektrotlar arasında ölçülen voltaj
vd	ve diğerleri
V_H	Hall voltajı
XRD	X- Işını kırınımı
ZnO	Çinko oksit
ZnS	Çinko sülfür
α	Lineer soğurma katsayısı

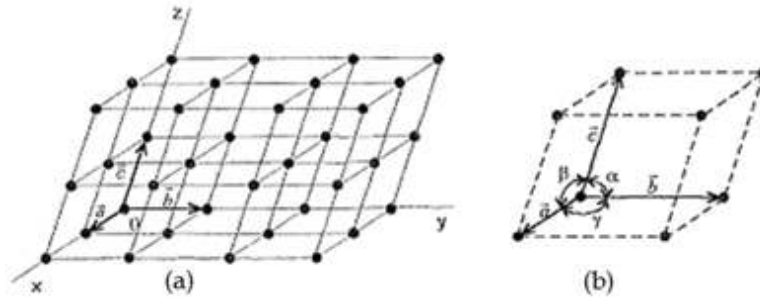
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

δ	Dislokasyon yoğunluğu
ε	Dielektrik sabiti
θ	XRD’de gelen ışın ile yansıtıcı düzlem arasındaki açı
λ	Dalgaboyu
μ	Mobilite
μm	Mikrometre
ν	Frekans
π	Pi sayısı
ρ	Özdirenç
σ	İletkenlik
ϕ	TVA’da katotun doğrultusu ile anotun düşey eksenini arasındaki açı
Ω	Ohm
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu

1. GİRİŞ

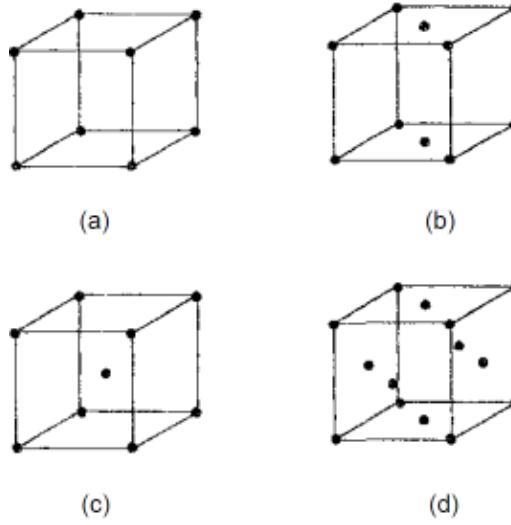
1.1. Kristal Yapılar

Katı maddeler, yapısal olarak amorf ve kristal yapıli katılar olmak üzere iki grup altında incelenebilir. Atom ya da molekülleri belirli bir düzene göre dizilmemiş katılar amorf yapıya sahiptirler. Cam ve plastik gibi maddeler amorf yapıli katılara örnek gösterilebilir. Atom ya da molekülleri üç boyutlu uzayda belirli bir düzene göre dizilmiş katılar ise kristal yapıya sahiptirler. Örneğin, yarıiletkenler kristal yapıdadır. Kristal yapılar bir örgü ile tanımlanabilir. Örgü, periyodik olarak sıralanmış noktalar dizisidir (Kittel, 1996). Bahsi geçen bu noktalar, özdeş atom veya atom gruplarından ibarettir (Şekil 1.1a). Bir birim hücre ise bir kristal örgünün tüm özelliklerini taşıyan en küçük parçası olup birim hücreyi tanımlamak için altı parametre yeterlidir. Bu parametreler; birim hücrenin kenar uzunlukları olan a , b , c ve bunların arasındaki açılar olan α , β , γ 'dır (Şekil 1.1b) (Cullity, 1966).



Şekil 1.1. Bir kristal örgüsü (a) ve bu örgüye ait birim hücre (b) (Caferov, 1998).

Bir kristal örgüyü oluşturan birim hücrelerin hepsi aynı hacim ve biçimdedir. Birim hücreler biçimlerine göre yedi temel sınıfa ayrılırlar. Bunlar; kübik, tetragonal, hekzagonal, trigonal, rombik, monoklinik ve triklinik. Ayrıca, örgüler birim hücrede bulunan atom sayılarına göre basit ve bileşik olabilir (Şekil 1.2). Basit örgüde atomlar yalnızca birim hücrenin düğümlerine yerleşebilirken bileşik örgülerde, atomlar birim hücrenin düğümlerinden başka, taban ve tavan yüzeyinin merkezinde, köşegenlerin kesişim noktasında ve tüm yüzeylerin merkezine yerleşebilir.

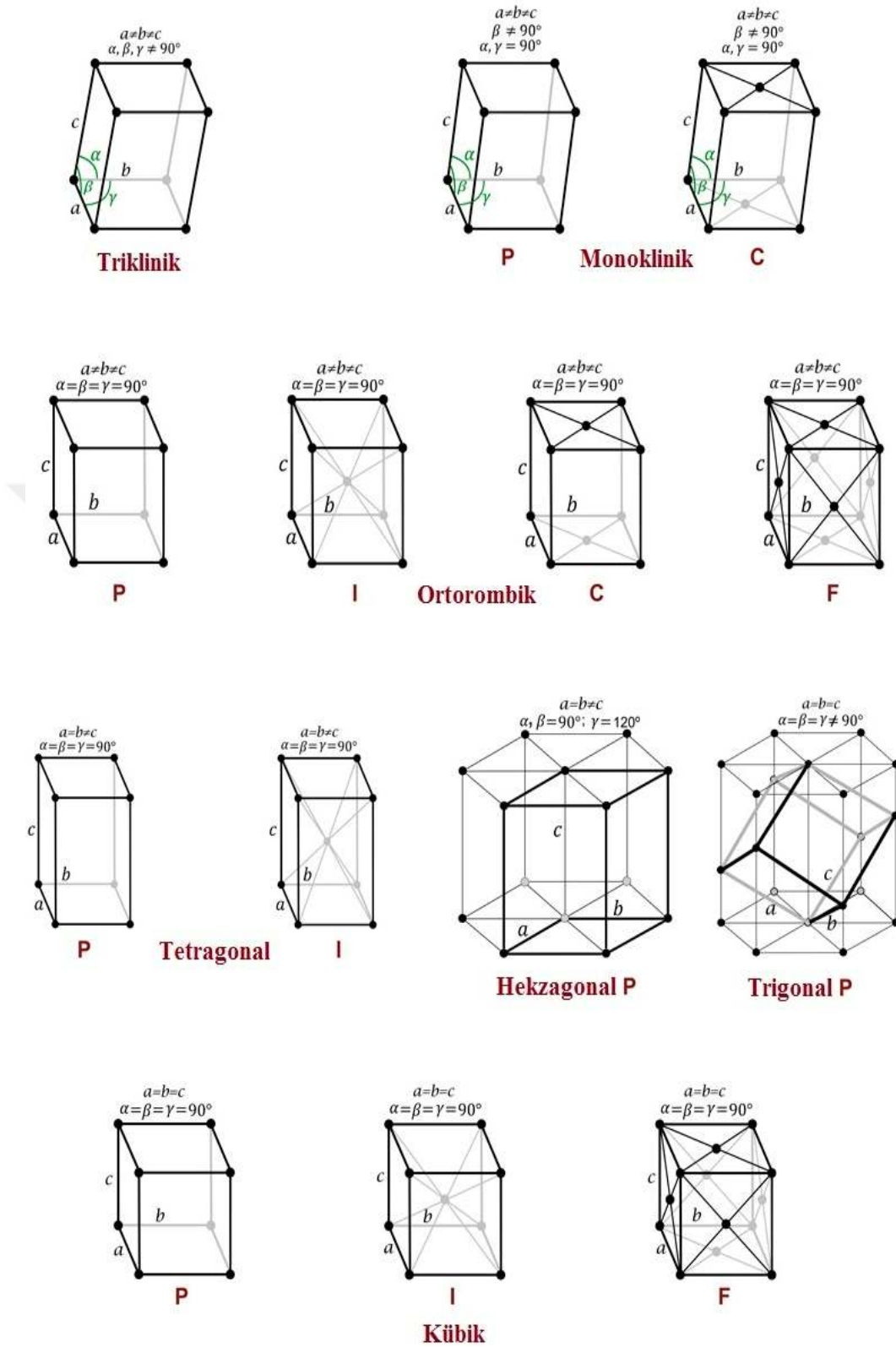


Şekil 1.2. (a) Basit örgü, (b) taban merkezli örgü, (c) hacim merkezli örgü ve (d) yüzey merkezli örgü (Caferov, 1998).

Çizelge 1.1. Üç boyutta kristal sistemleri (Kittel, 1996).

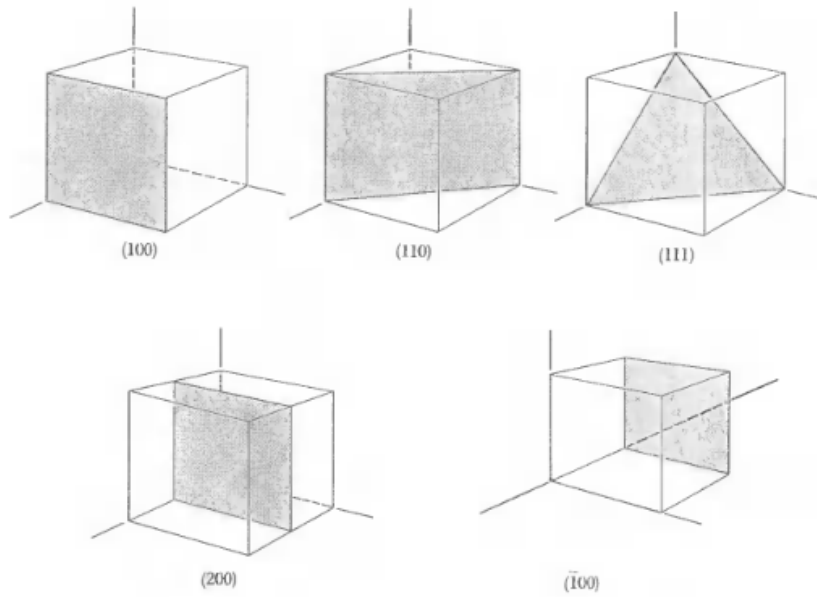
Sistem	Örgü sayısı	Birim hücre eksen ve açıların özellikleri
Kübik	3 (P, I, F)	$a = b = c, \alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$
Tetragonal	2 (P, I)	$a = b \neq c, \alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$
Hekzagonal	1 (P)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Trigonal (Rombohedral)	1 (P)	$a = b = c, \alpha = \gamma = \beta < 120^\circ, \neq 90^\circ$
Rombik (Ortorombik)	4 (P, C, F, I)	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$
Monoklinik	2 (P, C)	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triklinik	1 (P)	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$

Çizelge 1.1'deki basit örgü (P); sadece köşelerinde atom veya molekül bulunan örgüdür. Taban merkezli örgü (C); köşelerdeki atomlara ek olarak taban ve tavan merkezlerinde de birer atom bulundurulur. Yüzey merkezli örgü (F); köşelerdeki atomlara ek olarak tüm yüzey merkezlerinde de atom bulundurulur. Cisim merkezli örgü (I) ise; köşelerdeki atomlara ek olarak tam merkezde de atom bulundurulur. Üç boyutta, yedi kristal sisteminde on dört örgü vardır (Kittel, 1996). Kristallerde örgü kavramını ortaya koyan ilk gösterim Auguste Bravais tarafından yapıldığı için bu on dört örgü çeşidine “Bravais örgüleri” denir. Bu örgüler Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Bravais örgüleri (http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_03_4-en.html).

Bir kristal düzlemini belirtmek için o düzlemin kristal eksenlerini kestiği noktaların koordinat başlangıcına olan uzaklıkları kullanılabilir. Fakat bu durum, kristal eksenlerine paralel bazı düzlemler kristal eksenlerini sonsuzda kestiği için güçlük doğurmaktadır. Bu güçlüğü aşmak için, düzlemin kristal eksenlerini kestiği noktaların koordinat başlangıcına olan uzaklıklarını kullanmaktansa bu uzaklıkların terslerinden elde edilen Miller indisleri kullanılır. Herhangi bir kristal düzleminin Miller indislerini belirlerken o düzlemin $\vec{a}$, $\vec{b}$ ve $\vec{c}$ örgü öteleme vektörlerine paralel olarak seçilen kristal eksenlerini kestiği noktaların yerleri, sırasıyla; a, b ve c örgü sabitleri cinsinden ifade edilir ve bunlar sırasıyla x, y ve z ile gösterilir. x/a , y/b ve z/c oranları oluşturulur. a/x , b/y ve c/z oranları elde edilir. a/x , b/y ve c/z oranlarının ortak çarpanı araştırılır. Böyle bir ortak çarpan bulunabilirse, oranlar bu ortak çarpanla çarpılarak en küçük tamsayılar grubu elde edilir. Elde edilen tamsayılar grubu, bu düzleminin Miller indisleridir. Söz konusu düzlem, Miller indisleri cinsinden, (hkl) gösterimi ile temsil edilir. Bir düzlem, verilen bir eksene paralel ise eksen üzerindeki kesirsel kesen uzunluğu sonsuz alınırken karşılık gelen Miller indisleri ise sıfır alınır. Bir düzlem bir ekseni negatif tarafta keserse bu eksene karşılık gelen indis negatiftir ve indisin üzerine bir çizgi konularak yazılır (Kittel, 1996; Gezici, 1992; Dikici, 2012). Şekil 1.4'te kübik kristallerde bazı düzlemler ve bu düzlemlerin Miller indisleri gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Kübik kristallerde bazı düzlemler ve bunların Miller indisleri (Kittel, 1996).

1.2. Yarıiletkenler

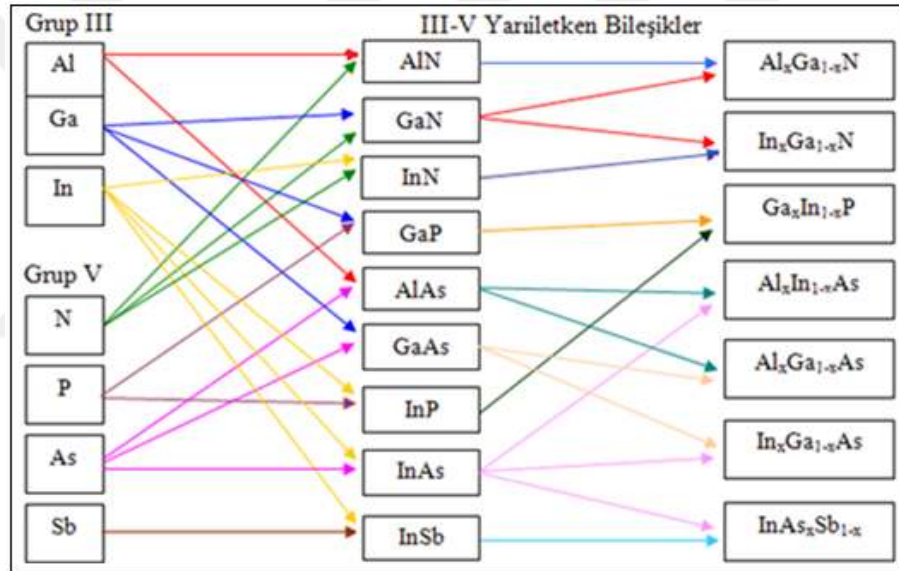
Yarıiletkenler, iletkenlikleri metaller ve yalıtkanlar arasında olan, sıcaklığın artmasıyla iletkenlikleri artan katı maddelerdir. Diğer önemli bir özellikleri ise, katkılama yoluyla iletkenliklerinin artmasıdır. Bu özellikleriyle yarıiletkenler, günümüzde çeşitli elektronik ve opto-elektronik cihazların temel yapıtaşlarını oluşturarak, hareketli yüklerin kaynağını sağlamak için kullanılır ve yüklerin aktığı, denetlendiği ortamı oluşturur. Temel taşıyıcı yarıiletkenlerin oluşturduğu cihazlar arasında transistör, anahtar diyot, fotovoltaiik güneş pili, dedektör, silisyum doğrultucular ve termistörler sayılabilir. Bu cihazlar tek başlarına devre elemanı olarak kullanılabileceği gibi entegre devrelerin bir parçası da olabilirler (Kittel, 1996).

Yarıiletkenler $T=0$ K sıcaklığında elektronlarla dolu olan bir valans bandı ile bu banttan yasak enerji aralığı kadar yukarıda, boş olan bir iletkenlik bandına sahiptir. Bu sıcaklıkta bütün elektronlar valans bandında bulunduğu için herhangi bir elektriksel iletim gözlenmez. Sıcaklığın $T=0$ K'den itibaren artmasıyla birlikte valans bandında bulunan elektronlar, iletkenlik bandına çıkarlar ve geride holler bırakırlar. Valans bandında oluşan bu holler diğer elektronlar tarafından doldurulur. Dolayısıyla hol ile elektron yer değiştirmiş olur. Böylelikle valans bandında holler, iletim bandında ise elektronlar yer değiştirerek iletme katkıda bulunurlar. Sıcaklıktaki artışın devamı halinde elektronların ve hollerin sayısı da artar ve bu yarıiletkenlerde iletkenliğin sıcaklıkla birlikte artmasını açıklar (McKelvey, 1966). Yarıiletkenlerde iletim elektronları ve holleri “serbest taşıyıcı” olarak adlandırılır. Birim hacimdeki serbest taşıyıcıların yoğunluğu yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini belirleyen önemli bir özelliktir (Omar, 1975; Streetman, 1980).

Saf bir yarıiletkende hollerin ve elektronların sayısı birbirine eşittir. Çünkü değerlik bandındaki bir hol sadece bir elektronun iletkenlik bandına çıkmasıyla oluşur. Bununla birlikte çoğu uygulamada tek tür taşıyıcı tipinin iletimde baskın olduğu yarıiletkenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden yarıiletken içerisine uygun yabancı atomlar eklenerek tek tür taşıyıcı tipinin iletimde baskın olduğu yarıiletkenler elde edilmektedir. Saf bir yarıiletkenin içerisine yabancı atomların eklenmesine “katkılama”, eklenen atomlara ise “katkı atomu” ya da “safsızlık atomu” denir. Safsızlık atomları taşıyıcı yoğunluğunu arttırdığından, orantılı olarak malzemenin elektriksel iletkenliğini de artırır.

Yarıiletkenler genel olarak üç ana sınıf altında gruplandırılabilir. Bunlardan ilki “doğal yarıiletkenler” olarak adlandırılan, periyodik tablonun IV. grubunda yer alan silisyum (Si) ve germanyum (Ge) elementleridir. İkincisi III. ve V. ya da II. ve VI. grup elementlerinin belirli oranlarda birleşmesiyle oluşan bileşik yarıiletkenlerdir. Üçüncüsü ise yarıiletken bir bileşiğe başka element(ler)in katılmasıyla oluşturulan üçlü veya dörtlü alaşım yarıiletkenlerdir. Bileşik ve alaşım yarıiletkenleri doğada bulmak mümkün değildir; bunlar yüksek teknoloji ihtiva eden sistemlerle yapay olarak üretilebilmektedirler.

1.2.1. III-V yarıiletkenler

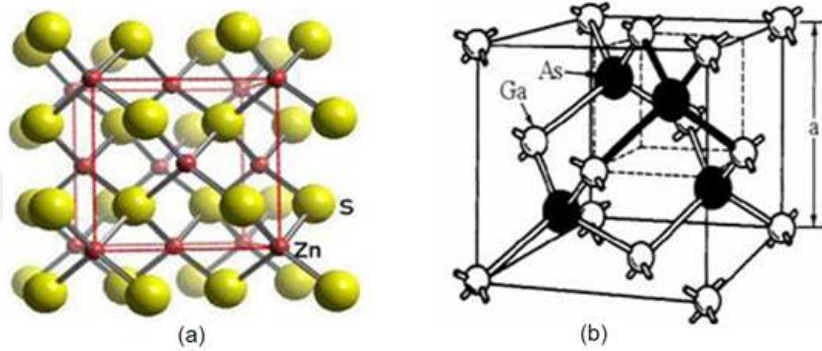


Şekil 1.5. III-V yarıiletken bileşik ve alaşımlar (Ashcroft ve Mermin, 1976).

Periyodik tablonun III ve V gruplarına ait elementlerin uygun biçimde birleşmesi ile oluşan yarıiletkenler elektronik ve opto-elektronik gibi teknolojik alanlarda kullanılmaya oldukça elverişli oldukları için literatürde geniş bir şekilde incelenmişlerdir. Bu yarıiletkenleri oluşturan III. grup elementleri Al, Ga ve In; V grup elementleri ise N, P, As ve Sb'dir. Yukarıda gösterilen Şekil 1.5'te bu elementlerin oluşturduğu yarıiletken bileşik ve alaşımlar verilmektedir. Bunlar arasından GaAs direkt bant aralığına, yüksek elektron mobilitesine ve yüksek soğurma katsayısına sahip bir yarıiletken olduğu için özellikle araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

1.2.1.1. Galyum arsenik bileşiğinin bazı fiziksel özellikleri

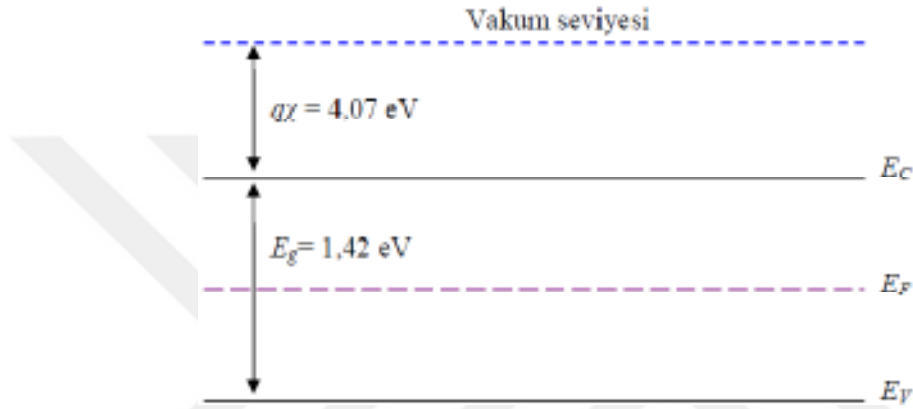
Galyum arsenik (GaAs) bir III-V yarıiletken bileşik olup F43m uzay grubuna karşılık gelen çinko sülfür (ZnS) yapıda kristalleşmektedir. Şekil 1.6a’da gösterilen Çinko sülfür yapı elmas yapının farklı atomlardan oluşan halidir (Kittel, 1996). Elmas yapı ise birbirinden [111] yönünde ($\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$) oranında ötelenmiş iki adet yüzey merkezli kübik yapının iç içe geçmesinden oluşur. Bir GaAs kristalinin birim hücresi Şekil 1.6b’de gösterilmektedir. Kristal yapının örgü sabiti a olmak üzere; Ga atomları yüzey merkezli kübik örgü şeklinde yerleşmiş olup, As atomları alt ve üstteki çapraz köşelerden karşılıklı olarak Ga atomlarından $a/4$ uzaklıkta merkeze yönelmiş olarak yerleşmişlerdir. Her bir As atomu kendine en yakın dört Ga atomuyla bağ yapmıştır.



Şekil 1.6. ZnS (a) ve GaAs (b) kristalinin birim hücresi.

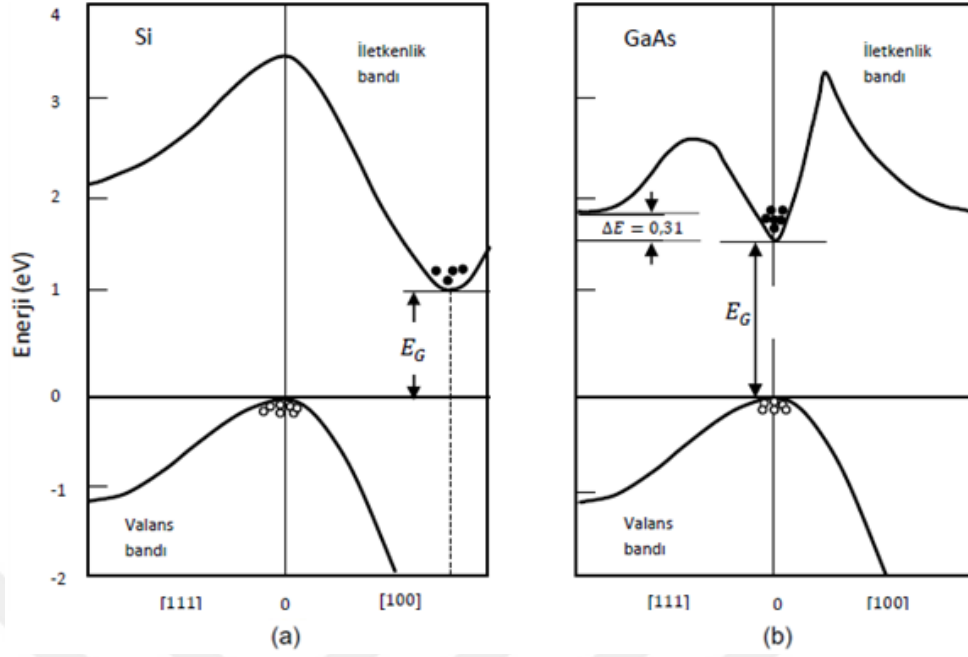
GaAs bileşiğinde, Ga atomu üç elektronunu, As atomu da beş elektronunu tetrahedral kovalent bağa katar. Bileşik farklı iki element içerdiği için bağ boyunca elektronların dağılımı simetrik değildir ve yük yoğunluğu atomlardan büyük olana kaymış durumdadır. Bunun sonucu olarak atomlardan biri net bir elektrik yükü fazlalığı taşır. Böyle bir bağ “heteropolar” olarak adlandırılır. GaAs’da yük dağılımı büyük atom olan arseniğe doğru kaymıştır. Başka bir deyişle, GaAs’da; As atomu Ga’dan daha büyük bir negatifliğe sahiptir ve atom başına eksi yük fazlalığı vardır. Ga ise pozitif yük fazlalığına sahiptir. Atom başına aktarılan yük “etkin yük” olarak adlandırılır (Dikici, 1993). Bu yük aktarması, bağlanmaya iyonik bir görünüm kazandırır. Bu yüzden bağlanma, kovalent ve iyonik bağların karışımıdır (Seeger, 2002).

Şekil 1.7 GaAs için enerji-bant diyagramını göstermektedir. Burada E_V , valans bandının tavan enerji seviyesi, E_F , Fermi enerji seviyesi, E_C , iletkenlik bandının taban enerji seviyesi, $q\chi$, elektron ilgisi ve E_g , yasak enerji aralığıdır. Fermi enerji seviyesi; dolu olan yörüngeleri dolu olmayan yörüngelerden ayıran izafi bir seviyedir. Vakum seviyesi; maddenin dışında hareketsiz duran bir elektronun enerjisidir. Elektron yakınlığı ise; iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır.



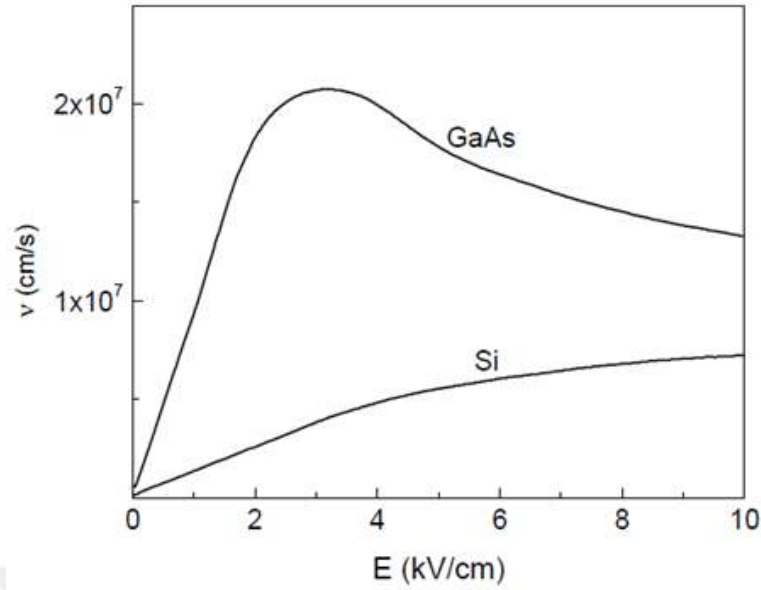
Şekil 1.7. GaAs için enerji-bant diyagramı (Pierret, 1989).

Silisyum (Si), günümüzde yarıiletken teknolojisinde en çok kullanılan malzemedir. Bunun sebepleri silisyumun doğada bol miktarda bulunması, kolay işlenmesi ve fiziğinin iyi anlaşılmış olmasıdır. Bununla birlikte Şekil 1.8’de, silisyumun valans bandının tavanı ile iletkenlik bandının tabanının aynı k değerinde olmadığı açıkça görülmektedir. Bu durumda valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişi esnasında momentum değişimi söz konusudur. Bu özelliğinden dolayı silisyum indirekt bant aralıklı yarıiletken sınıfına girer ve bu nedenle optik uygulamalarda kullanılamaz. Oysa aynı Şekil (Şekil 1.8) GaAs’ın iletkenlik bandının tabanıyla, valans bandının tavanının aynı k dalga vektörü değerinde olduğunu göstermektedir. Bu durum, valans bandından iletkenlik bandına geçen bir elektron için momentum değişimi olmayacağını göstermektedir. Bu özelliğinden dolayı GaAs, direkt bant aralıklı yarıiletken sınıfına girer ve opto-elektronik devrelerde kullanılabilir.



Şekil 1.8. (a) Si ve (b) GaAs için enerji-bant yapıları (Williams, 1990).

Herhangi bir yarıiletken bir elektrik alan uygulandığı zaman holler elektrik alanla aynı yönde, elektronlar ise elektrik alanla zıt yönde hareket ederler. Yüklü parçacıkların sürüklenme hızlarının, elektrik alanın büyüklüğüne oranı yarıiletkenin mobilitesini verir (Omar, 1975; Mott ve Davis, 1979; Kittel, 1996). GaAs, silisyum ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir elektron mobilitesine sahiptir. Mobilite, taşıyıcı hareketliliğiyle ilgili olup yük taşıyıcısının uygulanan elektrik alandan ne kadar etkilendiğini gösteren bir niceliktir. Bu nedenle taşıyıcı hızının uygulanan elektrik alanın büyüklüğüne karşı grafiği, taşıyıcı mobilitesi hakkında fikir vermektedir. Şekil 1.9, katkısız Si ve GaAs için uygulanan elektrik alan ile taşıyıcı hızlarının değişimini göstermektedir. Burada boş daireler ($\circ$), valans bandındaki pozitif boşlukları, dolu daireler ($\bullet$) ise iletkenlik bandındaki elektronları temsil etmektedir. GaAs için maksimum nokta ele alındığında GaAs'ın elektron mobilitesinin silisyumun mobilitesinden yaklaşık 4-5 kat daha yüksek olduğu açıkça görülebilir. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar, GaAs dijital devre elemanlarının silisyumdan yapılanlara göre 2 ile 5 kat arasında daha hızlı çalıştığını ve bununla birlikte daha az güç kaybına neden olduğunu bildirmektedir.



Şekil 1.9. Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi (Williams, 1990).

Güneş pilleri, önemli temiz enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisini kullanılabilir hale getiren cihazlardır. Bu cihazlar yarıiletken malzemelerden yapılırlar ve fotovoltaiik ilkeye; yani üzerlerine düşen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme esasına göre çalışırlar. Yarıiletken malzemeler içerisinde güneş pili üretimi için en uygun olanlar ise; silisyum, galyum arsenik, kadmiyum sülfür ve kadmiyum tellür'dür. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için yapılan çalışmalarda silisyum yine en çok kullanılan malzeme olma özelliğini korumaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere ucuz olan ve üretim teknikleri iyi bilinen bir malzeme olması sebebi ile tercih edilmesi normaldir. Buna karşın silisyum ile üretilen tek hücreli güneş pillerinde teorik verim %27 civarındadır ve pratik olarak bu orana henüz ulaşamamıştır. Son zamanlarda, yüksek verimliliklerinden dolayı GaAs'a dayalı güneş pillerine ilgi oldukça artmıştır. Daha az kristal malzeme kullanarak yüksek güçlere ulaşılabilen GaAs güneş pillerinin küçük alanlı olarak üretilebilmeleri, birim güç başına üretim maliyetlerinde azalmaya sebep olmaktadır.

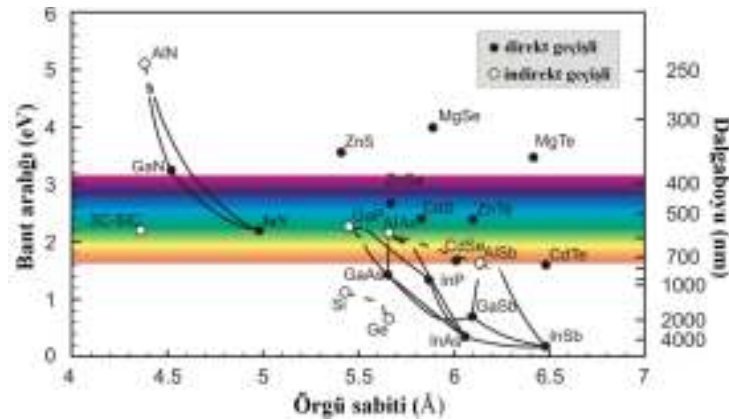
Bant aralığı 1,4 eV ile 1,6 eV arasında olan yarıiletkenler fotovoltaik çevrim için en uygun malzemelerdir. Bununla birlikte kullanılacak yarıiletkenin soğurma katsayısı yüksek olduğunda, güneş ışınları yarıiletkenin yüzeyinden itibaren daha kısa bir mesafede soğurulacaktır. Bu durumda, daha az malzeme kullanılarak güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü sağlanacaktır. GaAs oda sıcaklığında 1,42 eV bant aralığına sahiptir. Bu teorik olarak verimin %31 olarak hesaplanması demektir. Üstelik görünür dalga boyları için GaAs'ın soğurma katsayısı silisyumdan on kat fazladır. GaAs'ın güneş pili uygulamalarında tercih edilmesinin başka sebepleri de vardır. Bunlardan birisi, silisyuma göre daha iyi bir sıcaklık katsayısına sahip olmasıdır. Artan taşıyıcı birleşimi ve bant aralığının azalması sebebiyle güneş pili verimi sıcaklık arttıkça azalmaya eğilimlidir. Güneş pili yüksek sıcaklıkta çalışacaksa GaAs'ın performansı daha iyidir. Diğer bir faktör ise malzemenin ısınma direnciyle ilgilidir. GaAs'ın radyasyona dayanıklılığı silisyumdan daha iyidir. Bununla birlikte yüksek saflıktaki GaAs saf silikona göre daha pahalıdır. Fakat GaAs güneş pili üretim teknolojisi halen gelişmeye devam etmekte olup üretim maliyetleri ise giderek azalmaktadır (Nelson, 2003). Saf bir GaAs kristalinin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 1.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.2. GaAs bileşiğinin oda sıcaklığındaki temel bazı fiziksel özellikleri.

Yoğunluk (g/cm ³)	5,32
Atomik yoğunluk, (atom/cm ³)	4,42×10 ²²
Kristal yapısı	Çinko sülfür
Uzay grubu	F43m
Örgü sabiti, a (Å)	5,65
Özdirenç (Ωcm)	1,0×10 ⁸
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu Nc (cm ⁻³)	4,7×10 ¹⁷
Valans bandındaki durumların yoğunluğu Nv (cm ⁻³)	7,0×10 ¹⁸
Elektronların etkin kütlesi, (m _e) m*/m _o	0,06
Hollerin etkin kütlesi, (m _h) m*/m _o	0,51
Elektron yakınlığı, χ (eV)	4,07
Yasak enerji aralığı (eV)	1,42
Katkısız elektron hareketliliği (cm ² /Vs)	8500
Katkısız hol hareketliliği (cm ² /Vs)	400

1.2.1.2. AlGaAs ve InGaAs alaşımlarının bant aralıkları

Yarıiletken alaşımlama, yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı değerlerini ayarlayarak çeşitli uygulama alanlarına yönelik cihazların üretilebilmesini sağlar. Çok geniş bir uygulama alanını kapsadığı ve gelecekte de yeni uygulama alanları açılması beklendiği için özellikle III-V yarıiletken alaşımlar günümüzde yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. AlAs ve GaAs aynı kristal yapısına sahip olduğu için ve hem Al hem de Ga III. grup elementi olduğu için kristal yapı bozulmadan alüminyum GaAs içine karışarak katı bir çözelti oluşturabilir. Bu işlem sırasında, kristal örgünün Ga atomlarını bulunduran site üzerindeki Ga atomlarıyla Al atomları yer değiştirirken As atomlarını bulunduran sitede herhangi bir değişim olmaz. Bu şekilde AlAs ve GaAs ikili bileşiklerinden üçlü AlGaAs alaşımı üretilir. $Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletkeninde enerji bant aralığı AlAs ve GaAs bileşiklerinin örgü sabitlerine bağlıdır (Şekil 1.10). Bu durumda enerji bant aralığı değeri 1,42 eV (GaAs) ve 2,16 eV (AlAs) arasında değişir. Al konsantrasyonu (x değeri) ise 0-1 arasında bir değer alır ve bu değer alaşımdaki AlAs ve GaAs oranına bağlı olarak değişir. Fakat şu da var ki, yapıdaki Al konsantrasyonuna bağlı olarak bant tipi de değişmektedir. Kompozisyondaki Al atomlarının mol kesri takriben %40 ($x=0,4$) oranının üzerine çıktığında, oluşan yeni yapının bant tipi indirekt olacaktır (Piprek, 2003). Özellikle opto-elektronik aygıtlar için bir dezavantaj oluşturduğu için bu duruma dikkat edilmesi gerekmektedir. Bir başka üçlü alaşım olan $In_xGa_{1-x}As$ As'in bant aralığı ise 0,35 eV (InAs) ve 1,42 eV (GaAs) arasında değişmektedir.



Şekil 1.10. Bazı önemli yarıiletkenlerin örgü sabitleri ve bant aralıkları (http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd_html/node4.html).

1.3. İnce Film

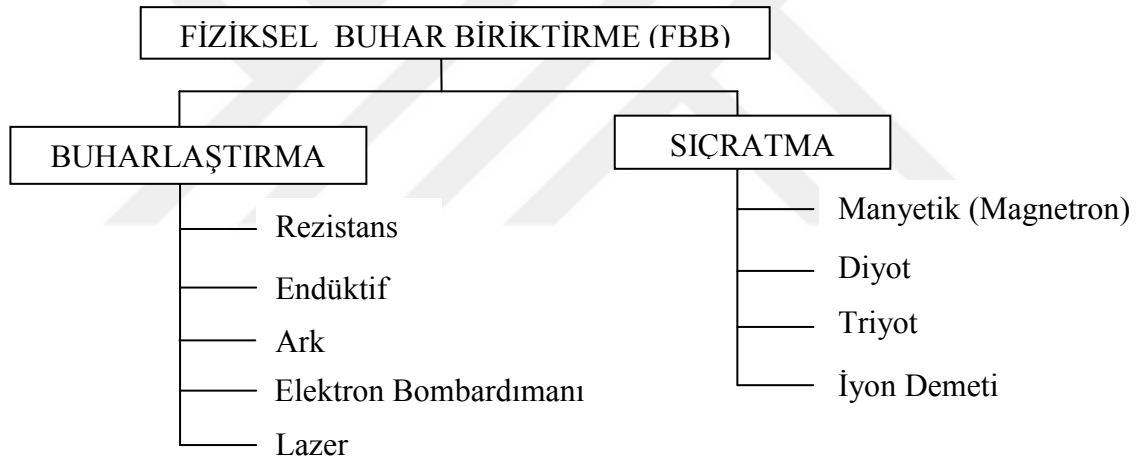
Bir alttaş üzerine herhangi bir ince film üretim tekniğiyle sıfırdan başlanarak büyütülen ve kalınlığı birkaç nanometre'den birkaç mikrometreye kadar olan tabakalara “ince film” denir. İnce filmler günümüzde elektronik cihazların, optik kaplamaların, sert kaplamaların ve dekoratif parçaların yapımında sıkça kullanılmaktadır. İnce filmler yapısal mükemmelliklerinin derecelerine bağlı olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bunlar; (i) “Tek katlı” ya da “homoepitaksiyel” olarak adlandırılan aynı malzemenin tek kristal alttaşı üzerine büyütülen tek kristal filmler, (ii) “Çok katlı” ya da “heteroepitaksiyel” olarak adlandırılan farklı materyalin tek kristali üzerine büyütülen tek kristal filmler, (iii) Cam, kuartz gibi amorf alttaşların üzerine çöktürülen polikristal filmlerdir. Polikristal filmler elektrik ve optik özelliklerinden dolayı güneş pili, yarıiletken fotodedektörler, diyotlar gibi birçok uygulama alanı olan, basit ve değişik yöntemlerle elde edilebilen yarıiletken malzemelerdir (Rudden ve Wilson, 1980; Sze, 1981).

1.4. İnce Film Üretim Teknikleri

Bilimsel ve teknolojik olarak oldukça önemli olan ince filmleri elde etmek için elektrokimyasal biriktirme (Gal vd., 2000), ultrasonik sprey piroliz (Kul vd., 2007; Aybek vd., 2008), sol-jel (Ilıcan vd., 2009), kimyasal banyo (Turan vd., 2009), sıralı iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (Kundakçı, 2011), döndürme ile kaplama (Ajadi vd., 2016), moleküler demet epitaksi (Chen vd., 2016), sıçratma (Korkmaz vd., 2016) ve daldırma ile kaplama (Zegadi vd., 2016) gibi çok çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Yüzey kaplamaları genel olarak buhar fazdan yapılan kaplamalar, sıvı fazdan yapılan kaplamalar, ergimiş veya yarı ergimiş fazdan yapılan kaplamalar ve katı fazdan yapılan kaplamalar olmak üzere dört ayrı grupta incelenebilir (Rickerby ve Matthews, 1991). Katı fazdan yapılan kaplamalar daha kalın tabakalar oldukları için çok fazla incelenmemekle birlikte, buhar fazından üretilen kaplamalar, günümüzde üzerinde en fazla çalışmanın yürütüldüğü, bilimsel ve teknolojik gelişmenin sağlandığı kaplamalardır. Buhar fazından yapılan kaplama yapan teknikler kimyasal buhar biriktirme (KBB) ve fiziksel buhar biriktirme (FBB) olmak üzere iki grupta incelenebilir. FBB, KBB'ye göre daha düşük sıcaklıklarda kaplama yapılmasına olanak sağlamakta, dolayısıyla KBB'de alttaş özelliklerini olumsuz yönde etkileyen yüksek sıcaklık etkisi FBB'de görülmemektedir (Boxman, 1995).

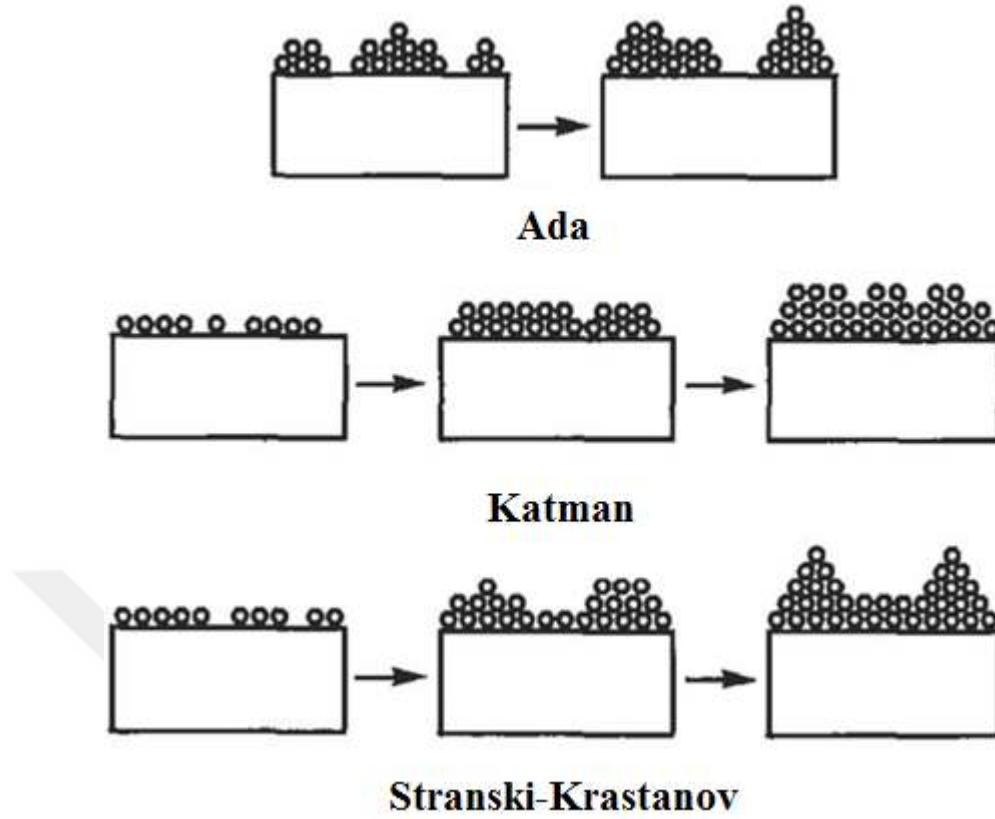
1.4.1. Fiziksel buhar biriktirme

FBB, vakum altında bir malzemenin buharlaştırılarak ya da sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve alttaş üzerine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanır (Şekil 1.11). FBB'nin vakum altında gerçekleştirilmesinin amacı buhar fazındaki malzemenin, alttaş yüzeyine ulaşana kadar ortamda bulunan diğer moleküllerle çarpışma olasılığını en aza indirmektir. FBB ile metaller, alaşımlar, metaller arası bileşikler ve refrakter bileşikler gibi birçok malzeme hemen hemen her malzemedan üretilmiş alttaşlar üzerine kolaylıkla kaplanabilir. Bunun yanı sıra FBB, yüksek biriktirme hızlarında çalışmaya imkân tanınması, düşük sıcaklıklarda kaplama yapabilmesi, ekonomik olması ve çevre kirliliğine yol açan zehirli atıklara neden olmaması gibi avantajlara da sahiptir.



Şekil 1.11. Fiziksel buhar biriktirme teknikleri (Holmberg ve Matthews, 1994).

FBB ile film oluşumunun ilk aşamalarında, yeterli sayıda atom veya molekül alttaş yüzeyinde yoğunlaşır ve kalıcı olarak bulunabileceği bölgeler oluşturur. Buna “çekirdeklenme” adı verilir. Bir sonraki aşamada, oluşan çekirdekler yayılarak birbirleriyle kaynaşırlar. Bu kaynaşma devam ettikçe, adacıklar birbirlerine bağlanırlar ve aralardaki boşluklar film malzemesi tarafından doldurulur. Sonuç olarak, boşluk içermeyen sürekli bir film yapısı oluşur (Ohring, 2002). Biriktirilen atomlar ile alttaş arasındaki etkileşime bağlı olarak ada büyümesi, tabaka büyümesi ve tabaka+ada büyümesi olmak üzere üç farklı tipte çekirdeklenme modeli mevcuttur (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Çekirdek büyüme modelleri (Ohring, 2002).

Ada büyümesi (Volmer-Weber modeli), alttaş yüzeyinde çekirdeklenmenin meydana gelmesi ve oluşan çekirdeklerin üç boyutlu adacıklar halinde büyümesiyle gerçekleşir. Bu büyüme modeli, biriktirilen atom ya da moleküllerin birbirleriyle yaptığı bağların, alttaş ile yaptıkları bağlardan daha kuvvetli olması durumunda meydana gelir. Tabaka büyümesinde (Frank van der Merwe modeli), en küçük kararlı çekirdeğin büyümesi, alttaş boyunca iki boyutlu olarak gerçekleşir ve sonuçta film tüm alttaş yüzeyini düzlemsel olarak sarar. Bu büyüme modelinde, atomların alttaş ile yaptığı bağlar, birbirleriyle yaptıkları bağlardan daha kuvvetlidir. Oldukça kuvvetli bağlanmış ilk katmanın üzerini, daha zayıf bağlı ikinci katman kapatır. Tabaka+ada büyümesi (Stranski-Krastanov modeli) ise, önceki iki modelin birleşimidir. Bu modelde bir veya birkaç tabakanın oluşumundan sonra ada büyümesi meydana gelir (Ohring, 2002). Çekirdeklenme tipi; film yoğunluğu, yüzey yapısı ve tane boyutu gibi birçok film özelliğini belirlemektedir.

1.5. Çalışmanın Konusu

İnce filmler üzerine yapılan bilimsel ve ticari çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir. Bu kadar popüler olan bir çalışma konusunda ince film üretimi için kullanılan pek çok teknik bulunmaktadır. Bu çalışmanın konusu olan katkılı ve katkısız GaAs ince filmleri, çeşitli alttaşlar üzerine biriktirmek için ise geçmişten günümüze kadar kimyasal buhar biriktirme, metal organik kimyasal buhar biriktirme, sıvı faz epitaksi, moleküler demet epitaksi, RF magnetron sıçratma, lazer ablasyon ve termiyonik vakum ark gibi birçok teknik kullanılmıştır (Kressel vd., 1968; Schade vd., 1971; Mizuguchi vd., 1986; Chen vd., 1993; Azevedo vd., 2005; Liu vd., 2006; Xu vd., 2007; Kageyama vd., 2009; Heiss vd., 2011; Choi vd., 2012; Abderrafi vd., 2012; Özen vd., 2015a; Pat vd., 2015a). Bunlar arasından termiyonik vakum ark, vakumda gerçekleştirilen, özgün fakat çok yaygın olmayan bir plazma destekli FBB tekniğidir. Bu teknik hâlihazırda Romanya'da iki ve Türkiye'de bir araştırma grubu tarafından kullanılmakta olup bu tekniğin özgünlüğü plazma üretimi için bir tampon gazı ihtiyaç duymamasından ve filmin biriktirilirken kaplanacak materyalin yüksek enerjili iyonlarıyla bombardıman edilmesinden kaynaklanmaktadır.

1.6. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı özgün bir FBB tekniği olan termiyonik vakum ark ile katkılı ve katkısız GaAs ince filmler üretmek ve üretilen filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel, bileşimsel ve elektriksel özelliklerini oldukça iyi bilinen güvenilir teknikler ile incelemektir. Çalışma kapsamında katkısız GaAs ve Co, Al, In, C, Si ile Ge safsızlıkları katkılanmış GaAs ince filmler cam alttaşlar üzerine tek katmanlı olarak biriktirilmiştir. Üretilen ince filmlerin bazı fiziksel özellikleri X-ışını difraktometresi (XRD), spektroskopik reflektometre, UV/VIS/NIR spektrofotometre, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), enerji dağılımı spektrometresi (EDS), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), akım gerilim kaynağı ve Hall etkisi ölçüm sistemi gibi cihazlar kullanılarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir. TVA ile katkılı ve katkısız GaAs ince filmlerin üretilmesi ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olduğu için bu çalışmanın önemi böyle bir çalışmanın ilk kez gerçekleştirilmesidir.

2. YARIİLETKENLER

Katılar, elektriksel davranışları bakımından iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç grupta incelenirler. İletkenler elektrik akımını iyi iletirken, yalıtkanlar elektrik akımını iletmezler. Yarıiletkenler ise, mutlak sıfır sıcaklığında iyi bir yalıtkan iken, oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlikleri, iletkenlere göre daha zayıf, yalıtkanlara göre ise daha iyi olan maddelerdir. Yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran en belirgin özellik, sıcaklık arttıkça iletkenliğin artmasıdır (Kittel, 1996; Omar, 1975). İletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalır. Özdirenç değerleri ise iletkenlikle ters orantılı olarak değişir. İletkenlerin özdirenci sıcaklıkla artarken, yarıiletkenlerde özdirenç sıcaklığın artması ile azalır. Oda sıcaklığında iletkenlerin özdirençleri 10^{-8} - 10^{-3} Ωcm arasında değişirken yalıtkanların özdirençleri 10^8 - 10^{20} Ωcm arasındadır. Bu iki grup arasında yer alan ve özdirenci 10^{-3} - 10^8 Ωcm arasında değişen malzemeler ise yarıiletkenlerdir.

Yarıiletkenler, bütün katı maddeler içerisinde en kullanışlı maddeler arasındadır. Yarıiletkenler ile 1920'li yıllardan beri çalışılmasına rağmen 1947'de William Shockley, John Bardeen ve Walter Brattain'in transistörü icat etmesinden sonra yarıiletkenlerin üstün yetenekleri fark edilmiştir. Bu olay ve birbirini takip eden diğer benzer birçok gelişme sayesinde katı hal fizikinde en etkin şekilde çalışılan malzemeler yarıiletkenler olmuştur. Bu sayede yarıiletkenlerin özellikleri hakkında pek çok yeni şey öğrenilmiş, bu bilgilerle daha yeni ve daha etkili cihazların tasarlanması mümkün olmuştur (Omar, 1975).

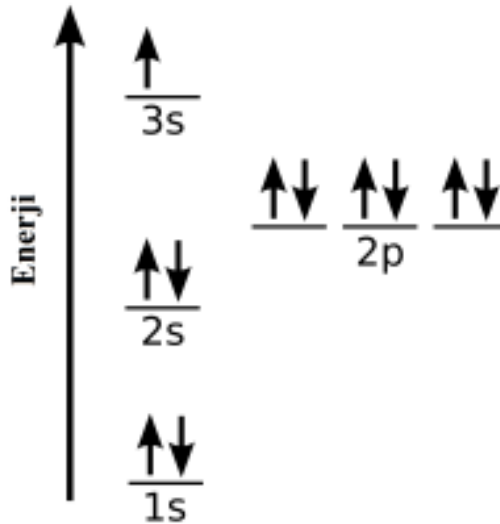
Yarıiletkenler genel olarak element, bileşik ve alaşım yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Günümüzde özellikleri en iyi bilinen ve en çok kullanılan yarıiletkenler dördüncü grup elementleri olan Si ve Ge elementleridir. Yarıiletkenlerin diğer önemli bir bölümünü ise GaAs, InSb, GaP ve InAs gibi III-V bileşikleri oluşturur. Bu bileşikler periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grup elementlerinin bileşik oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşurlar. Periyodik tablonun ikinci sütununda yer alan bir element ile altıncı sütununda yer alan bir element bir araya getirilerek II-VI bileşikleri de elde edilebilir. Bu grubun örnekleri ise; ZnO, ZnS ve CdS gibi bileşiklerdir (Omar, 1975). Alaşım yarıiletkenler ise bileşiğe belirli miktarda farklı elementlerin katılmasıyla oluşturulan üçlü ya da dördümlü yarıiletkenlerdir. Alaşım yarıiletkenlere $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ örnek olarak verilebilir.

2.1. Katıların Bant Teorisi

İletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların birbirinden farkı öz direnç kriterinden ziyade daha genel ve tam olarak katıların bant teorisi ile açıklanabilir. Katıların bant teorisini anlamak için ise, benzer atomlar katı bir kristali oluşturacak şekilde bir araya geldiklerinde, bu atomların elektronik seviyelerinin nasıl davranacağını bilmek gerekir. İki izole atom birbirlerine yaklaştığında her bir atomik enerji seviyesi ikiye yarılr. Bir katı kristal ele alındığında bu maddede bir birine örgü sabiti mesafesinde yakın N sayıda atom bir arada bulunmaktadır. Dolayısıyla enerji seviyeleri N 'ye yarılmış olacaktır. Bu enerji seviyeleri arasındaki fark o kadar küçüktür ($\sim 10^{-19}$ eV) ki bu enerji grubu dürekli bir enerji bandı olarak düşünülebilir (McKelvey 1966; Pankove 1971). Atomlardaki enerji seviyeleri arasındaki farka katılarda bantlar arası boşluk karşılık gelir.

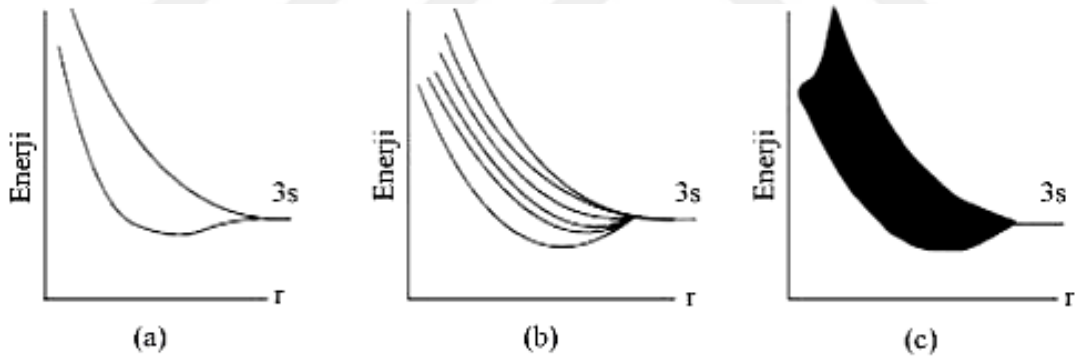
2.1.1. Katılarda enerji bantlarının oluşumu

Şekil 2.1'deki sodyum atomuna ait elektron enerji seviyelerini gösteren diyagram incelenirse, sodyumun 11 elektronunun, Pauli dışarlama ilkesine göre dizilip 1s, 2s, 2p, seviyelerinin tam dolduğu, 3s seviyesinin ise tam dolmadığı görülür.



Şekil 2.1. Sodyum atomuna ait elektron konfigürasyonu.

İki özdeş sodyum atomu birbirine yaklaştığında, en dış kısımdaki aynı enerji seviyesine sahip elektronlar (3s elektronları) birbirleriyle etkileşmeye başlar. Bu durum elektronların enerji seviyelerini etkiler ve dalga fonksiyonları üst üste binmeye başlar. Bu iki atom arasındaki etkileşim yeterince kuvvetli olduğunda Şekil 2.2a’da olduğu gibi iki farklı 3s seviyesi oluşur. Çok sayıda atom katıyı oluşturmak için bir araya geldiğinde de benzer olay katlanarak meydana gelir ve Pauli ilkesine göre aynı kuantum sayılarına sahip iki elektron bulunamayacağından atomik enerji seviyeleri yarılmaya başlar. Örneğin, Şekil 2.2b’de görülen birbirine çok yakın altı atomun enerji seviyelerindeki yarılmalar incelenirse, sistemin altı tane 3s enerji seviyesi ve altı tane üst üste örtüşen dalga fonksiyonu vardır. Şekil 2.2c’de gösterildiği gibi çok daha fazla sayıda atom bir araya geldiğinde ise, enerji seviyelerindeki yarılmalarda komşu seviyeler arasındaki mesafe o kadar küçülür ki enerji seviyeleri sürekli bir bant şeklinde gösterilir. Bu sebeple atomdaki elektronların enerji seviyeleri katılarda enerji bantları ile ifade edilir. Bir başka deyişle katıdaki her enerji seviyesine bir enerji bandı tekabül etmektedir.

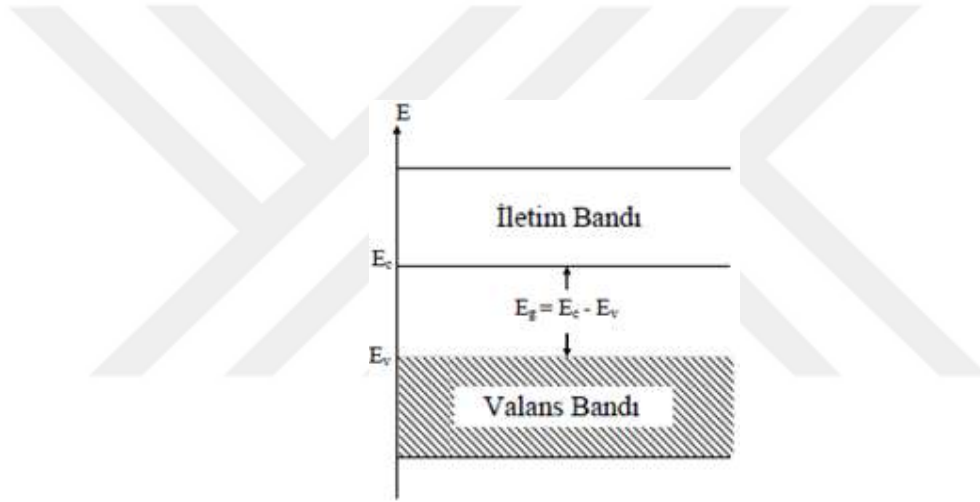


Şekil 2.2. (a) İki sodyum atomu birbirine yaklaştığında 3s seviyesinin yarılması (b) altı sodyum atomu bir araya geldiğinde 3s seviyelerinin yarılması (c) katıyı oluşturmak üzere çok sayıda sodyum atomu bir araya geldiğinde 3s bandının meydana gelişi.

Bir katıda oluşan enerji bantlarının arasındaki enerji düzeylerinde elektron bulunamaz. Yani bir katının elektronik bant yapısı bir takım izinli ve yasak enerji bantları içerir. Elektronların bulunduğu bölgelere “izinli bant” bulunmadığı bölgelere ise “yasak bant” denir. Bütün katıların (iletkenler, yarıiletkenler, yalıtkanlar) kendilerine özel bant yapıları olup bir katının bant yapısı, o katının optiksel ve elektriksel özellikleri hakkında bilgi verir.

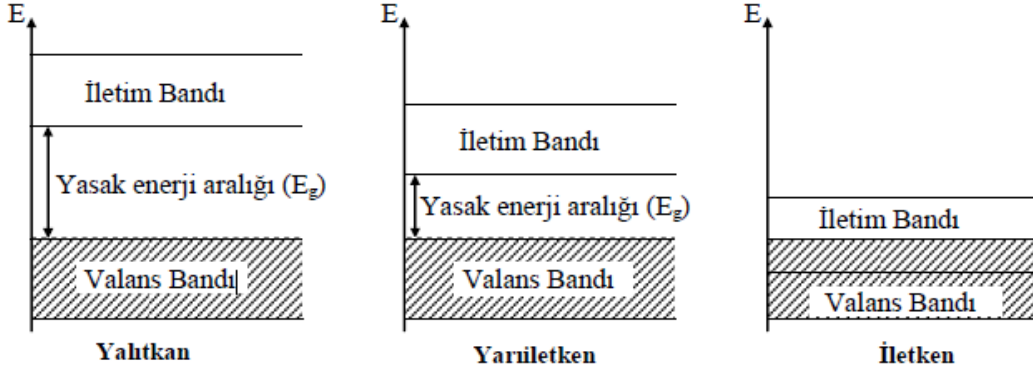
2.1.2. Katıların bant yapısı

Katıların bant teorisi en dıştaki üç bant ile ifade edilir. Buna göre, değerlik elektronlarından oluşan enerji bandına “valans bandı” denir. Değerlik elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan banda ise “iletim bandı” denir (Streetman, 1980; Omar, 1975). Valans ve iletim bantlarının arasında yasak bant bulunmaktadır (Seeger, 2002). Saf bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 2.3’te gösterilmektedir. Burada; E_V bağlı elektronların bulunduğu valans bandının sahip olabileceği en yüksek, E_C ise iletme katkıda bulunan serbest elektronların sahip olabileceği en düşük enerji seviyesini gösterir. E_C ve E_V enerjilerinin farkı yarıiletkenin yasak enerji aralığını ifade eder.



Şekil 2.3. Bir yarıiletkenin mutlak sıfır sıcaklığında basit bant yapısı.

Katıların bant teorisine göre, valans bandı tamamen elektronlarla dolu, iletim bandı ise tamamen boş olan katılara “yalıtkan” adı verilir. Yalıtkanlarda bu iki bant arasındaki yasak enerji aralığının büyük olması nedeniyle elektronların valans bandından iletim bandına geçmeleri imkânsızdır. Yasak enerji aralığı daha küçük olan katılara da “yarıiletken” adı verilir. Yarıiletkenler $T=0$ K’de iletim bandı boş, valans bandı dolu olduğu için yalıtkanlardır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise valans bandından iletim bandına elektron geçebileceği için iletkenlik özelliği kazanırlar. Valans bandı ile iletim bandının üst üste bindiği katılara ise “iletken” denir. İletkenlerde ise iletim bandı ile valans bandı çakışık olduğu için iletim bandında her zaman elektronlar bulunmaktadır. Şekil 2.4’te yalıtkan, yarıiletken ve iletkenlerin enerji bant yapıları gösterilmektedir (Kittel, 1996).



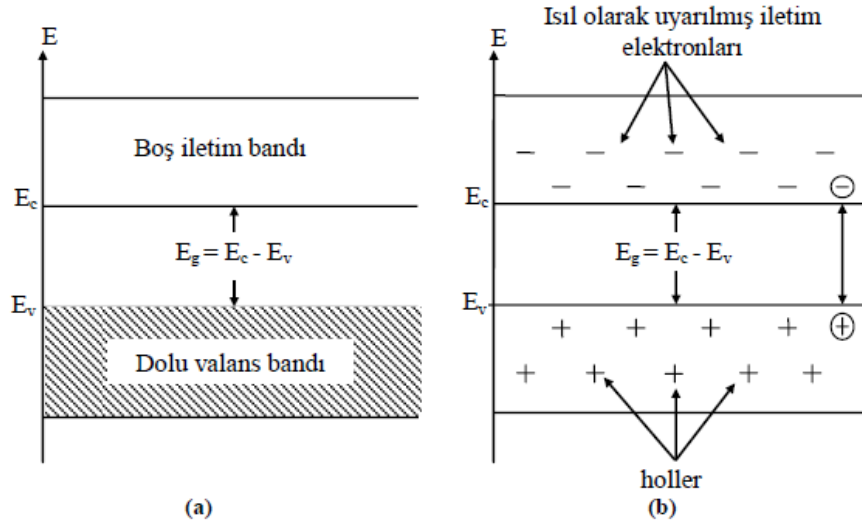
Şekil 2.4. Enerji bant teoremine göre yalıtkan, yarıiletken ve iletken gösterimi.

2.2. Yarıiletken Tipleri

Yarıiletkenler saflık derecelerine göre katkısız yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki grupta incelenirler. İçerisinde yabancı atom katkısı bulunmayan bir yarıiletken “has yarıiletken” olarak adlandırılır. Has yarıiletken malzemelerin karakteristikleri (bant yapısı, elektriksel özellikleri vs.), malzemeye bazı katkı atomları eklenerek büyük ölçüde değiştirilebilir. Yarıiletkene uygulanan bu yabancı atom ekleme işlemine “katkılama” denir. Katkılama işlemi yapılan yarıiletken malzemeye de “katkılı yarıiletkenler” adı verilir.

2.2.1. Has yarıiletkenler

Hiçbir safsızlık içermeyen bir yarıiletken kristal “has yarıiletken” olarak adlandırılır. Böyle bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur, fakat sıcaklık yükseldikçe yarıiletkende elektronlar termal uyarılmayla valans bandından iletim bandına geçerler ve geride deşikler (holler) bırakırlar. Buna göre, has yarıiletkenlerde, iletim bandındaki elektronların yoğunluğu valans bandındaki hollerin yoğunluğuna eşittir. Bir başka deyişle bu yarıiletken türünde iletim bandındaki elektron sayısı, valans bandındaki hol sayısına eşittir. Çünkü bir elektron ısı uyarma sonucu daima geride bir boşluk bırakarak iletim bandına geçer. Has yarıiletkenlere örnek olarak saf silisyum (Si) ve germanyum (Ge) verilebilir (Smith, 1978; Dikici, 1993).



Şekil 2.5. Has yarıiletkenin farklı sıcaklıklardaki iletim ve valans bandı (a) $T=0K$, (b) $T>0K$ (McKelvey, 1966).

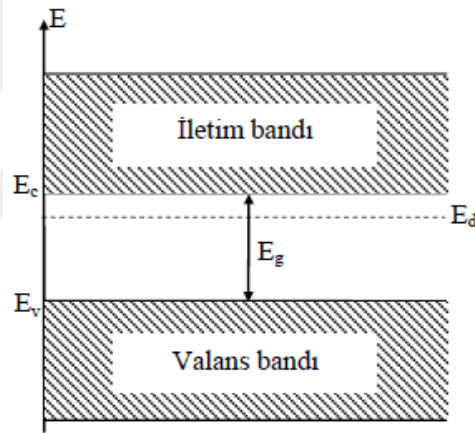
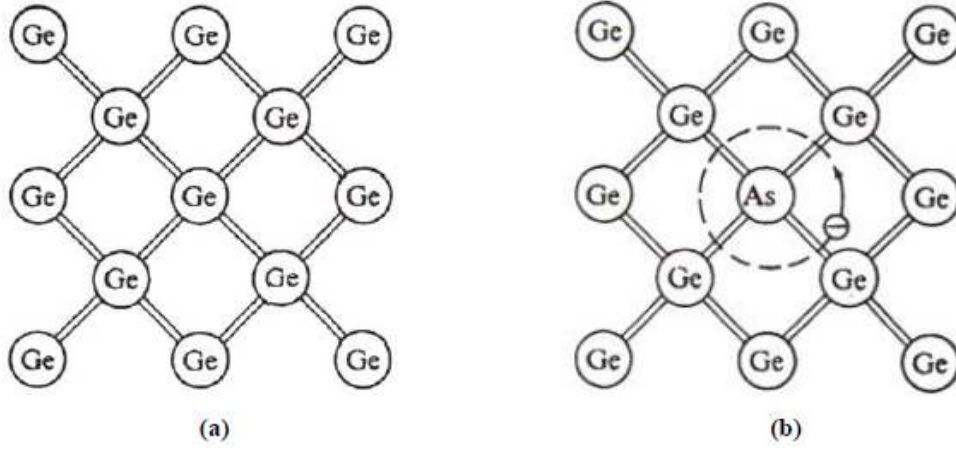
Şekil 2.5a'da görüldüğü gibi has yarıiletkenlerin $T=0K$ 'de valans bandı tamamen elektronlarla dolu iken iletim bandı ise tamamen boştur. Dolayısıyla yarıiletkenler mutlak sıfır sıcaklığında elektriksel özellikleri bakımından yalıtkan gibi davranırlar. Şekil 2.5b'de görüldüğü gibi mutlak sıfırdan daha yüksek herhangi bir sıcaklıkta ($T>0K$), en az yarıiletkenin yasak enerji aralığı kadar ısı enerji kazanan elektronlar, yasak enerji aralığını aşarak, valans bandından iletim bandına geçerler. Valans bandından iletim bandına geçen bu elektronlar, valans bandında "hol" adı verilen deşikler bırakırlar. Bu holler, valans bandındaki diğer elektronlar tarafından doldurulurlar. Dolayısıyla, hol ile elektron yer değiştirmiş olur. Yani, pozitif yüklü olan hol, valans bandı içinde hareket etmiş olur. Böylece, yarıiletkenlerde, iletim bandında elektronlar ve valans bandında da holler hareket ederek iletme katkıda bulunurlar (McKelvey, 1966). Madde üzerine bir elektrik alanının uygulanması ve ışık düşürülmesi gibi işlemler de sıcaklığın artması ile benzer sonucu vererek maddeyi iletken duruma getirir.

2.2.2. Katkılı yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin kullanıldığı birçok uygulamada, tek bir taşıyıcı tipinin etkin olduğu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerini değiştirmek amacıyla, yarıiletkeni oluşturan atomların bazılarının yerine farklı atomlar yerleştirilir. Bu tip yarıiletkenlere “katkılı yarıiletken” adı verilir. Yarıiletkene katkılanan katkı atomları ya elektron verici (donör) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak görev yaparlar. Bir yarıiletken uygun katkı atomları ile katkıldığında çoğunluk taşıyıcıları holler ya da elektronlar olan malzemeler elde edilebilir (Omar, 1975; Hook ve Hall, 1999). İletkenliğin çoğunlukla elektronlar ile sağlandığı yarıiletken “n-tipi”, holler ile sağlandığı yarıiletken ise “p-tipi” olarak adlandırılır (Kittel 1996; Omar 1975).

2.2.2.1. n-tipi yarıiletkenler

Germanyum veya silisyum gibi has yarıiletkenlere beşinci grup elementlerinden olan fosfor (P), arsenik (As) veya antimuan (Sb) elementlerinin katkılanması ile n-tipi yarıiletkenler elde edilir. Şekil 2.6a’da görüldüğü gibi saf germanyum atomları komşusu olan dört germanyum atomu ile kovalent bağ yapar. Bağlar iki elektron içerdiğinden çift çizgiyle gösterilmiştir. Tüm elektronlar bağa katıldıkları için bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için E_g ’ye eşit veya büyük bir enerjiye ihtiyaç vardır. Şekil 2.6b’de görüldüğü gibi, germanyum kristali içerisine periyodik tablonun beşinci grup elementlerinden olan arsenik katkılanırsa, arseniğin beş valans elektronundan dört tanesi germanyum atomları ile kovalent bağ yapar. Beşinci elektron çok zayıf elektrostatik kuvvetlerle arsenik atomuna bağlıdır. Küçük bir enerji ile bu elektron arsenik atomundan kopabilir. Dolayısıyla yasak enerji değeri E_g ’den çok daha küçük bir enerji ile iletim bandında bir elektron oluşturulabilir. İletim bandında oluşan bu elektrona karşı valans bandında bir hol oluşmaz. Burada, arsenik atomu elektron verdiği için “donör atom” olarak isimlendirilir (Taylor ve Zafaritos, 1996). Donör atomlarının enerji seviyesi (E_d), Şekil 2.7’deki enerji bant diyagramında gösterilmektedir.

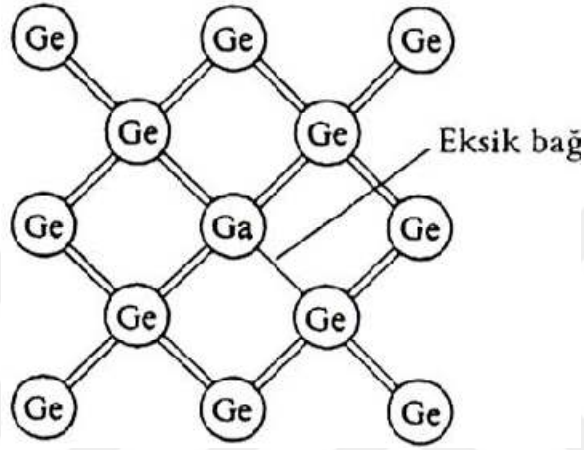


Şekil 2.7. Bir yarıiletkenin donör enerji seviyesi (E_d).

Donör atomları ile katkılanan yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu, hol yoğunluğundan daha büyük olduğundan bu tür yarıiletkenlere “n-tipi yarıiletkenler” denir. n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar “çoğunluk taşıyıcı”, holler ise “azınlık taşıyıcı” olarak isimlendirilir (Smith, 1990).

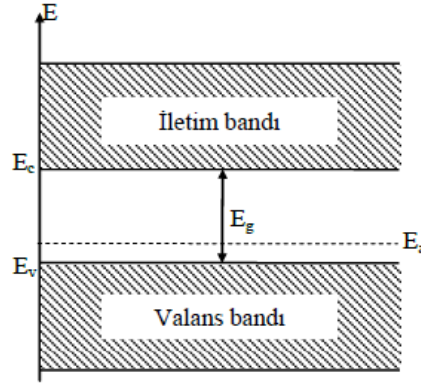
2.2.2.2. p-tipi yarıiletkenler

Germanyum veya silisyum gibi saf yarıiletkenlere III. grup elementlerinden olan indiyum (In), galyum (Ga), bor (B) ve alüminyum (Al) elementlerinin katkılanması ile p-tipi yarıiletkenler elde edilir (Taylor ve Zafaritos, 1996).



Şekil 2.8. Galyum katkılanmış germanyum kristali (Taylor ve Zafaritos, 1996).

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, germanyum kristali içerisine periyodik tablonun III. grup elementlerinden olan galyum katkılanırsa, galyumun üç valans elektronu germanyum atomları ile kovalent bağ yapar. Germanyum ile galyum atomu arasında bir bağ eksik kalır. Komşu atomlardan bir elektron az bir enerji ile buraya gelebilir. Dolayısıyla yasak enerji aralığından daha küçük bir enerji ile valans bandında hol oluşur. Valans bandında oluşan bu hole karşılık iletim bandında bir elektron oluşmaz. Burada, galyum atomu, elektron aldığı için “akseptör atom” olarak isimlendirilir. Akseptör atomlarının enerji seviyesi (E_a), Şekil 2.9’daki enerji bant diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Bir yarıiletkende akseptör enerji seviyesi (E_a).

Akseptör atomları ile katkılanan yarıiletkenlerde hol yoğunluğu, elektron yoğunluğundan daha büyük olduğu için bu tür yarıiletkenlere “p-tipi yarıiletkenler” denir. p-tipi yarıiletkenlerde holler “çoğunluk taşıyıcı”, elektronlar ise “azınlık taşıyıcı” olarak isimlendirilir.

2.3. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

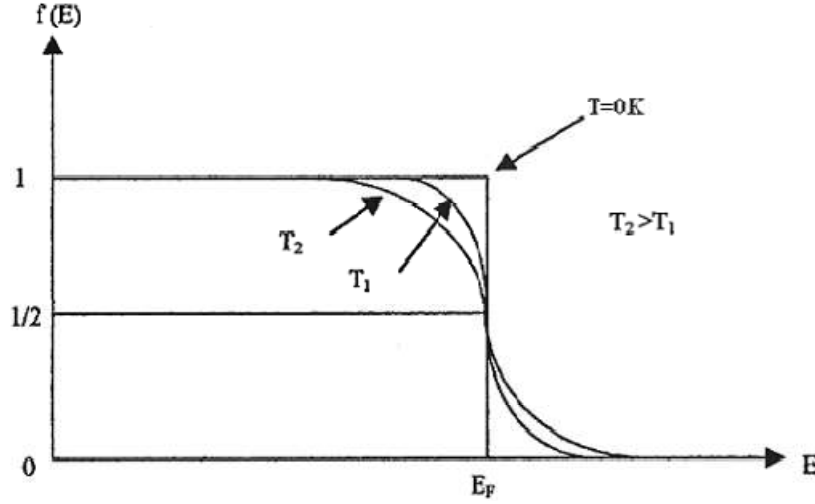
2.3.1. Yarıiletkenlerde taşıyıcı konsantrasyonu

Yarıiletkenlerde birim hacimdeki taşıyıcı sayısı, yarıiletkenin önemli bir özelliği olup yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini etkiler. Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa bağlıdır. Fermi–Dirac dağılım fonksiyonu, bir yarıiletken için taşıyıcıların yoğunluğunu belirlemek için kullanılır. Fermi–Dirac fonksiyonu,

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılır. Burada; E_F Fermi seviyesi, k ise Boltzman sabitidir.

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, T sıcaklığında, belirli bir E enerji seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığını verir. Bu fonksiyonun enerji ile değişimi Şekil 2.10’da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu (Omar, 1975; Streetman,1980).

Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu değerlendirildiğinde; $T \rightarrow 0 \text{ K}$ iken, $E < E_F$ için $(E - E_F)/kT \rightarrow -\infty$ ve $E > E_F$ için ise $(E - E_F)/kT \rightarrow \infty$ olur. Böylece $f(E < E_F) = 1$ ve $f(E > E_F) = 0$ bulunur. Buna göre $T = 0 \text{ K}$ iken E_F 'nin altındaki tüm enerji seviyeleri dolu ve E_F 'nin üstündeki tüm enerji seviyeleri boştur. $T > 0 \text{ K}$ ve $E = E_F$ için $f(E) = 1/2$ olur. Yani Fermi enerji seviyesinin işgal edilme olasılığı $1/2$ 'dir.

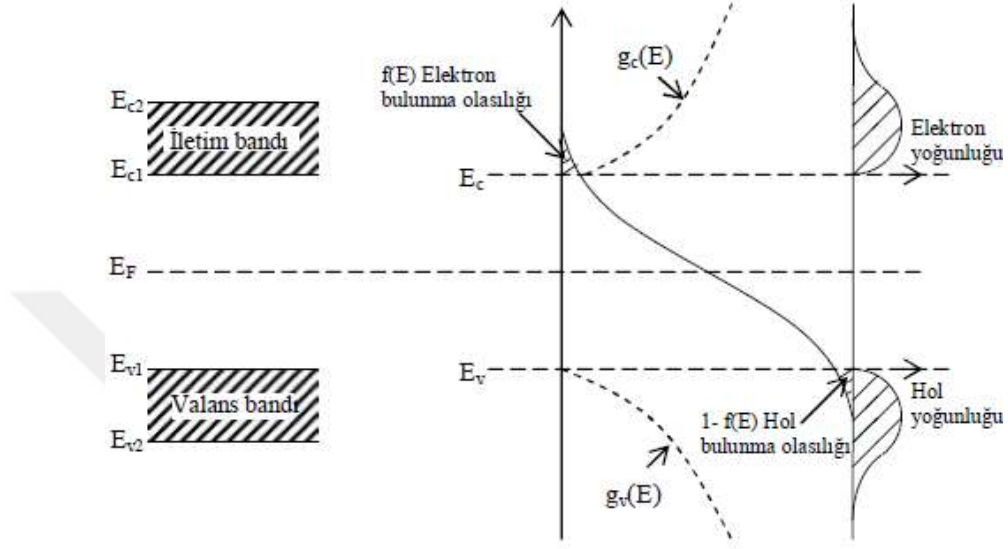
$(E - E_F) \gg kT$ olması durumunda $e^{(E-E_F)/kT}$ değeri 1'den çok büyük olacağından 1 sayısı ihmal edilebilir ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu Maxwell-Boltzman dağılım fonksiyonuna dönüşür. Bu fonksiyon,

$$f(E) = e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \quad (2.2)$$

şeklindedir. Bu fonksiyona göre iletim bandındaki elektron yoğunluğu hesaplanabilir. Burada, E ile $E + dE$ enerji aralığında bulunan durumların sayısı $g_C(E)dE$ ile verilir. Burada; $g_C(E)$ iletim bandındaki elektronlar için durum yoğunluğudur. Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı $f(E)$ ise, bu enerji aralığında elektronların yoğunluğu $f(E)g_C(E)dE$ olarak ifade edilir. İletim bandındaki elektron yoğunluğu n ,

$$n = \int_{E_{C1}}^{E_{C2}} f(E)g_C(E)dE \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; E_{C1} ve E_{C2} , iletim bandının sırasıyla alt ve üst enerji değerleridir. Şekil 2.11’de dağılım fonksiyonu ve durum yoğunluğunun enerjiye göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.11. Bir yarıiletkende $m_e^* = m_h^*$ durumunda a) iletim ve valans bantları b) dağılım fonksiyonu ile iletim ve valans bantlarındaki durum yoğunlukları (Omar, 1975).

İletim bandındaki durum yoğunluğu $g_C(E)$,

$$g_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (2.4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada m_e^* iletim bandındaki elektronların etkin kütlesidir.

Eğer $E < E_C$ ise yasak enerji aralığında izinli bir durum bulunamayacağından $g_C(E)$ sıfıra gider. $E_C \leq E$ ise $g_C(E)$ sonludur. Valans bandının üst sınırını sıfır enerji kabul edip Denklem (2.3)’teki E_{C1} ve E_{C2} sınırları yerine sırasıyla E_g ve ∞ değerlerini kullanarak ve Denklem (2.4)’ü Denklem (2.3)’te yerine yazarak,

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F}{k_B T}} \int_{E_C}^{\infty} (E - E_C)^{1/2} e^{-\frac{E}{k_B T}} dE \quad (2.5)$$

elde edilir. İntegral, sınır değerlerine göre alınırsa elektron yoğunluğu n ,

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \quad (2.6)$$

olarak N_C ,

$$N_C = 2 \left(\frac{m_e^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (2.7)$$

olarak alınırsa,

$$n = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \quad (2.8)$$

olarak bulunur. Burada; N_C , iletim bandında elektronlar için etkin durum yoğunluğudur. Bu ifadede üstel olmayan terim üstel olan terime göre sıcaklıkla daha yavaş bir şekilde değişir (Omar, 1975; Nag, 1980). Aynı şekilde valans bandındaki hol yoğunluğu p ise

$$p = \int_{E_{V_1}}^{E_{V_2}} (1 - f(E)) g_V(E) dE \quad (2.9)$$

bağıntısı ile verilir. Burada; $g_V(E)$ valans bandındaki izinli hol enerji durum yoğunluğu, $g_V(E)dE$ holler için $(E, E + dE)$ enerji bölgesindeki durumların sayısı, E_{V_1} ve E_{V_2} ise valans bandının alt ve üst sınır değerleridir. Bu durumların her birinin işgal edilme olasılığı $(1 - f(E))$ olduğu için, bu enerji bölgesinde bulunan hollerin yoğunluğu $(1 - f(E))g_V(E)dE$ 'ye eşittir. Böylece valans bandında hol yoğunluğu p ,

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)} \quad (2.10)$$

olar ve N_V ,

$$N_V = 2 \left(\frac{m_h^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \quad (2.11)$$

olarak alınırsa

$$p = N_V e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)} \quad (2.12)$$

olarak bulunur. Burada; N_V valans bandındaki holler için etkin durum yoğunluğunu ve m_h^* ise holün etkin kütlesini göstermektedir (Mckelvey, 1966; Omar, 1975).

Eğer yarıiletken has bir yarıiletken ise iletim bandındaki elektron yoğunluğu valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit ve çarpımları verilen bir sıcaklıkta sabit olup

$$n = p \quad (2.13)$$

$$np = n_i^2(T) \quad (2.14)$$

yazılabilir. Bu bağıntıya “mass-action yasası” adı verilir (Sze, 1981). Burada $n_i(T)$ has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu olup sıcaklığın bir fonksiyonudur. Elektron ve hollerin taşıyıcı yoğunlukları için bulunan bağıntılar Denklem (2.13)’te yerine yazılırsa, taşıyıcı yoğunluğu $n_i(T)$,

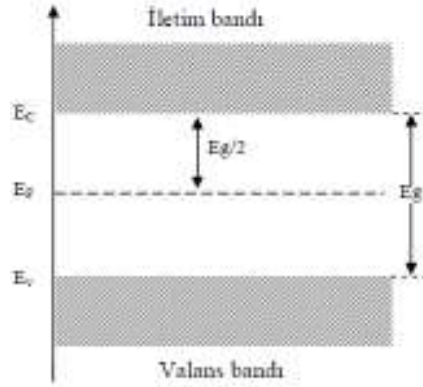
$$n_i(T) = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)} \quad (2.15)$$

bağıntısı ile verilir. Verilen bir yarıiletkende yasak enerji aralığı ve etkin kütleler bilinirse taşıyıcı yoğunluğu yalnızca sıcaklığın bir fonksiyonu olacaktır.

$T=0K$ sıcaklığında bir katı maddenin elektronlarının Pauli dışarlama ilkesine uyarak bütün enerji seviyelerini doldurduğunda en üstteki seviyeye “Fermi enerji seviyesi” adı verilir. Has yarıiletkenlerde elektron ve hol konsantrasyonları eşit olacağından, Denklem (2.8) ve Denklem (2.12), Denklem (2.13)’te yerine yazılırsa has yarıiletkenler için Fermi enerji seviyesi E_{F_i} ,

$$E_{F_i} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır. Has yarıiletkenlerde, elektron ve hol etkin kütleleri birbirine eşit olarak alınırsa ($m_e^* = m_h^*$) Fermi enerji seviyesi Şekil 2.12’de gösterildiği gibi yasak enerji aralığının tam ortasında bulunur (Smith, 1978).



Şekil 2.12. Has yarıiletkenlerde ($m_e^* = m_h^*$) olduğunda Fermi enerji seviyesi ($T=0$ K).

2.3.2. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik ve özdirenç

Bir maddenin elektriksel iletkenliği, o maddede atom başına düşen serbest elektrik yükü sayısı ile belirlenir (Mott ve Davis, 1979; Serin, 1990). Serbest elektrik yükünün madde ortamında hareket edebilme yeteneğini ifade eden hareketlilik (mobilité) ise elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde rol oynayan başka bir parametredir. Mobilité elektrik alan başına serbest elektrik yükünün hızı olarak tanımlanır. Serbest elektrik yükünün içinde hareket ettiği elektrik alan $\vec{E}$ ile elektrik yükünün hızı ise $\vec{v}$ ile gösterilirse mobilité μ ,

$$\mu = \frac{|\vec{v}|}{|\vec{E}|} = \frac{v}{E} \quad (2.17)$$

olarak ifade edilebilir. Elektrik alanın, akım yoğunluğuna oranı o maddenin özdirencini tanımlar ve

$$\rho = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{j}|} = \frac{E}{j} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılır. Bir maddenin elektriksel iletkenliği, elektrik alan başına düşen akım yoğunluğu olup aynı zamanda özdirencin tersine eşittir ve

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanır (Kittel, 1996; Serin, 1990). Yarıiletken malzemenin uçlarına uygulanan gerilime dayalı olarak oluşan J akım yoğunluğu

$$\vec{J} = qn\vec{v} \quad (2.20)$$

şeklinde yazılır. Bu bağıntıda q elektrik yükü olup n birim hacimdeki iletim elektronlarının sayısını ifade eder (Ohring, 1992). Elektriksel iletkenlik, mobilite cinsinden

$$\sigma = qn\mu \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir. Katkısız bir yarıiletkende elektriksel iletim, holler ve elektronlar tarafından sağlanır ve

$$\sigma_i = qn_i(\mu_e + \mu_h) \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Bu bağıntıda ise σ_i , katkısız (intrinsic) elektriksel iletkenlik; n_i katkısız taşıyıcı sayısı, μ_e ve μ_h elektronların ve hollerin mobiliteleri ve q ise elektronun yüküdür. Yarıiletken madde bir miktar katkılандığında artık serbest elektron ve hol sayıları eşit olmadığından dolayı katkılı bir yarıiletkende elektriksel iletkenlik σ ,

$$\sigma = qn\mu_e + qp\mu_h \quad (2.23)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada, n ve p birim hacimdeki serbest elektronlar ve hollerin sayısı olup katkılı bir yarıiletkenin özdirenci ρ ,

$$\rho = 1/(qn\mu_e + qp\mu_h) \quad (2.24)$$

olur. Yarıiletkenin n-tipi olması durumunda Denklem (2.24)'te paydadaki ikinci terim birinci terimden çok küçüktür. Yani $qn\mu_e \gg qp\mu_h$ 'dir. Bu durumda, n-tipi yarıiletkende öz direnç ρ_n ,

$$\rho_n \cong 1/(qn\mu_e) \quad (2.25)$$

olarak bulunur ve p-tipi yarıiletkende ise $qp\mu_h \gg qn\mu_e$ olduğundan öz direnç ρ_p ,

$$\rho_p \cong 1/(qp\mu_h) \quad (2.26)$$

olur. Katkısız yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik, valans bandında oluşan hollerin iletkenliği ile iletim bandında bulunan elektronların sebep olacağı iletkenlikler toplamına eşittir ve sıcaklığa bağlılığı,

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_a/kT} \quad (2.27)$$

denklemleri ile verilir. Burada σ_0 , bir sabit olup E_a , iletkenlik için ısı aktivasyon enerjisidir (Mott ve Davis, 1979; Lubianiker ve Baberg, 1997). Yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklık dışında, elektrik alan, manyetik alan, aydınlanma, dış basınç gibi çevre şartlarına da bağlıdır (Mott ve Davis, 1979). Bunun yanında, yük taşıyıcılarının mobilitesi, sayısı ve kristal yapıdaki kusurların yoğunluğu da iletkenlikte oldukça etkilidir (Mott ve Davis, 1979).

2.4. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

Bir yarıiletken malzeme üzerine ışık düşürüldüğünde; fotonların ortamdaki atomlar ile etkileşmesi sonucu soğurma, geçirme, yansıma ve kırılma gibi optik olaylar meydana gelir (Mott ve Davis, 1979; Askeland, 1998). Yarıiletken üzerine gönderilen fotonun enerjisi yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük ($h\nu \geq E_g$) ise elektron fotonun enerjisini alarak ya doğrudan ya da dolaylı olarak valans bandından iletim bandına geçer. Bu olay yarıiletkenlerde “soğurma” olarak adlandırılır (Kittel, 1996). Kalınlığı t olan bir malzemeye ışık gönderildiğinde, gelen ışığın şiddeti I_0 ile malzemeyi geçen ışığın şiddeti I arasında,

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (2.28)$$

ilişkisi vardır. Bu ifadeye Lambert-Beer kanunu denir. Burada α lineer soğurma katsayısını ifade etmektedir (Pankove, 1971; Omar, 1975; Streetman, 1980; Sze, 1981; Al-Ani vd., 1999; Natsume ve Sakata, 2000). Denklem (2.28)'den lineer soğurma katsayısı α ,

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = 2,303 \frac{\log_{10}(I_0/I)}{t} \quad (2.29)$$

olarak ifade edilebilir.

Yarıiletken üzerine gönderilen fotonun enerjisi malzemenin yasak enerji aralığından küçük ($h\nu < E_g$) ise malzeme fotonu soğuramaz ve bu malzeme foton için saydam özellik gösterir. Bu olaya “geçirme” denir. Geçirgenlik, malzemeyi geçen ışığın şiddetinin malzemeye gelen ışığın şiddetine oranı olarak tanımlanır ve

$$T = I/I_0 \quad (2.30)$$

eşitliği ile verilir. Geçirgenlik (T) ve absorbans (A) arasındaki ilişki ise

$$A = -\log T \quad (2.31)$$

eşitliği ile verilir (Skoog vd., 1998). Buna göre, soğurma spektrumundan

$$T = 10^{-A} \quad (2.32)$$

eşitliği ile geçirgenlik bulunabilir ve dalga boyuna karşı grafiği çizilebilir.

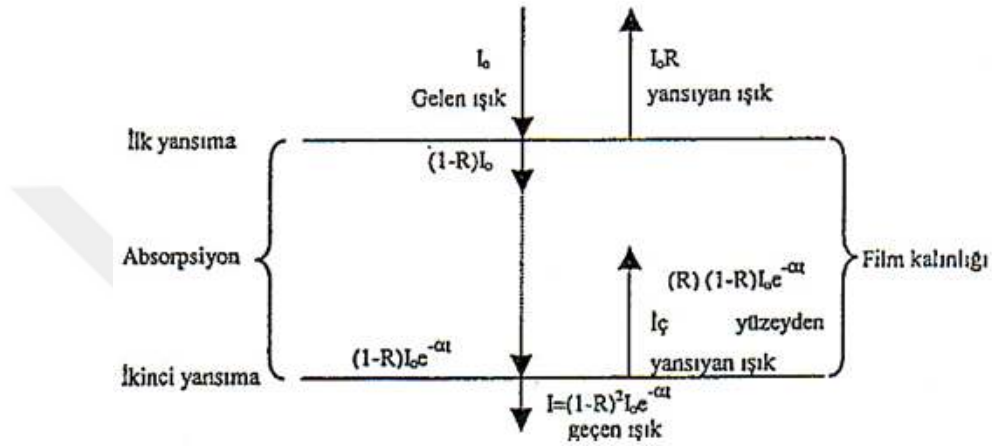
Yansıma (R) malzeme yüzeyinden yansıyan ışığın şiddetinin malzeme yüzeyine gelen ışığın şiddetine oranı olarak tanımlanır. Yarıiletken yüzeyine gelen ışığın şiddeti; soğurulan, geçen ve yansıyan ışığın şiddetlerinin toplamına eşittir (Smith, 1990).

$$I_0 = I_A + I_T + I_R \quad (2.33)$$

Yukarıdaki eşitlik bir başka şekilde absorbans, geçirgenlik ve yansımaya cinsinden

$$A + T + R = 1 \quad (2.34)$$

şeklinde de ifade edilebilir (Callister, 2004).



Şekil 2.13. Malzemeye dik gelen ışığın soğurulma, geçirilme ve yansımaları.

Şekil 2.13'ten görüldüğü gibi malzemeyi geçen ışığın şiddeti I ,

$$I = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha l} \quad (2.35)$$

ile verilir. Geçirgenlik ve yansımaya arasındaki ilişki ise

$$T = (1 - R)^2 e^{-A} \quad (2.36)$$

denklemleri ile verilir (Pankove, 1971; El-Zahed, 2001). Denklem (1.36)'dan faydalanılarak

$$R = 1 - \sqrt{10^{-A} e^A} \quad (2.37)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklem absorbans ölçümünden yansımaya bulma imkânı sağlar. Buna göre, soğurma katsayısının yansımaya ve geçirgenlik ile ilişkisi,

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T} + R^2} \right) \quad (2.38)$$

eşitliği ile verilir (Al-Ani vd., 1999; Hernandez vd., 2002).

Işık yarıiletken malzeme içerisinde enerjisinin bir kısmını kaybeder. Kaybolan enerji nedeniyle ışığın hızı azalır. Hız kaybeden ışık yön değiştirir ve kırılmaya uğrar. Işığın boşluktaki hızının malzeme içindeki hızına oranı “kırılma indisi” olarak tanımlanır. Yarıiletken bir malzeme için kompleks kırılma indisi $\tilde{n}$,

$$\tilde{n} = n_0 + ik \quad (2.39)$$

eşitliği ile verilir. Burada n_0 kırılma indisinin gerçel kısmı olup kırılma indisini vermektedir. n_0 ,

$$n_0 = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (2.40)$$

ile ifade edilir. Sanal kısım olan k ise sönüm katsayısıdır ve

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (2.41)$$

olarak ifade edilir (Pankove, 1971; Fox, 2001; Xue vd., 2008). Bu denklemde λ gelen ışığın dalgaboyudur.

Bir malzemenin kırılma indisi dalga boyunun veya frekansın bir fonksiyonudur. Yüksek kırılma indisli malzemeler düşük kırılma indisli malzemelerden daha fazla yansıtma özelliğine sahip olurlar. Malzemenin yapısında daha yüksek atom numarasına sahip atomların bulunması durumunda elektron sayısı artacağından kırılma indisi de artar. Aynı zamanda, malzemedeki elektronların polarizasyon kabiliyeti yüksek olduğunda, fotonlarla daha çok etkileşirler ve daha fazla kırılmaya sebep olurlar. Ayrıca, yarıiletken malzemenin kırılma indisi ile dielektrik sabiti arasında bir ilişki vardır.

Bir malzemenin kompleks dielektrik sabiti ϵ ,

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.42)$$

eşitliği ile verilir. Optik ölçümler ile yansıma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı doğrudan ölçülebilirken dielektrik sabiti ϵ doğrudan ölçülemez. Dielektrik sabiti ve kırılma indisi arasında

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (2.43)$$

ilişkisi bulunmaktadır (Kittel, 1996; Durlu, 1996). Dielektrik sabitinin gerçel kısmı ϵ_1 ,

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.44)$$

ve sanal kısmı ϵ_2 ,

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.45)$$

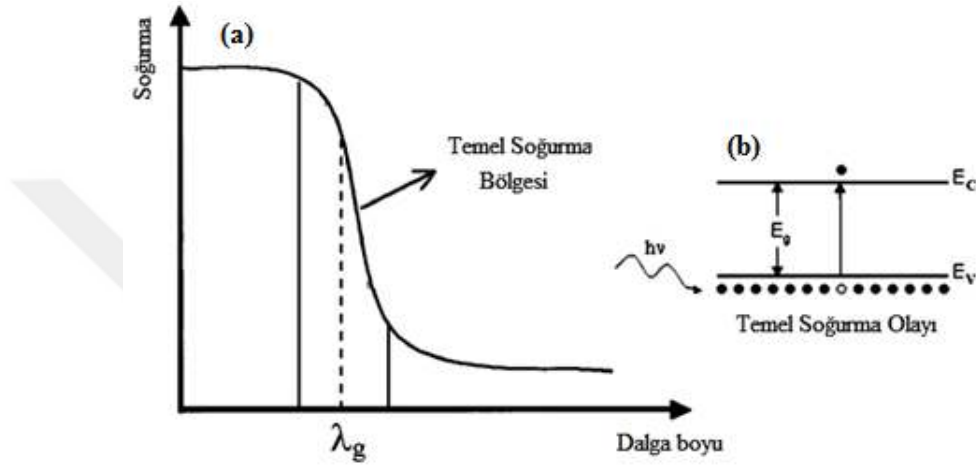
denklemleri ile verilmektedir (Kittel, 1996; Benramdane vd., 2003).

2.4.1. Yarıiletkenlerde soğurma olayları

Yarıiletkende soğurma olayı dört şekilde olur. Birincisi, valans bandında bulunan bir elektronun bir fotonu soğurarak iletim bandına geçmesi ile oluşan soğurma olayıdır. Buna “temel soğurma” denir. İkincisi, yasak enerji aralığında bulunan eksitonların fotonlar tarafından uyarılarak iletim bandına geçmesi olayı, üçüncüsü valans bandındaki holler ile iletkenlik bandındaki serbest elektronların fotonlar tarafından uyartılarak daha yüksek enerjili durumlara yükselmesi ve dördüncüsü de katkı atomlarının fotonlar tarafından uyarılması olayıdır (Rudden ve Wilson, 1980).

2.4.1.1. Temel soğurma olayı

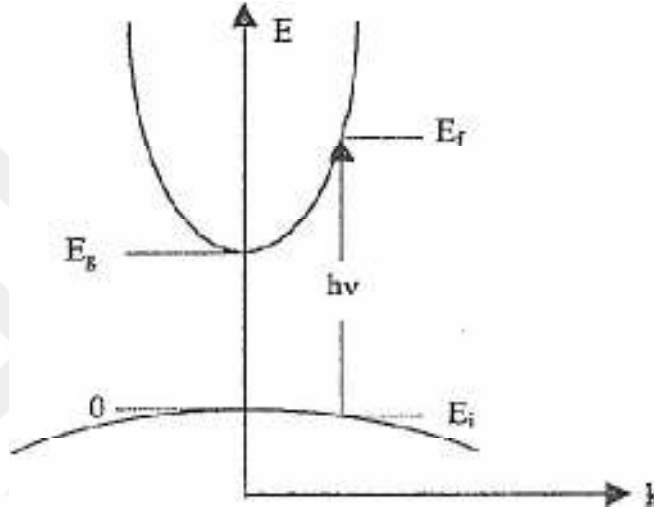
Yarıiletken malzeme üzerine gelen bir fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da ondan büyükse ($h\nu \geq E_g$), Şekil 2.14'te görüldüğü gibi valans bandındaki bir elektron bu fotonu soğurarak iletim bandına geçer (Pankove, 1971).



Şekil 2.14. Yarıiletkenlerde soğurma spektrumu (a) ve temel soğurma olayı (b).

Yarıiletkenlerde tipik soğurma spektrumu Şekil 2.14'te verilmektedir. Buna göre, uzun dalgaboylarında yani küçük enerjilerde soğurma değerleri düşüktür ve bu dalgaboyu aralığında malzeme üzerine gelen fotonların enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından küçüktür ($h\nu < E_g$). Bu bölgede yarıiletken yüksek derecede geçirgen olarak davranır ve saydamdır. $h\nu > E_g$ olan kısa dalgaboylarında, yani yüksek enerjilerde malzemenin soğurma özelliği baskınlaşır ve yarıiletken opak bir malzeme olarak davranır. Saydamlıktan opaklığa keskin geçiş bölgesi ise temel soğurma bölgesi olarak bilinir ve bir yarıiletkenin yasak enerji aralığı bu bölge içerisine düşer. Yarıiletken malzemelerin temel soğurma bölgesinde direkt ve indirekt geçiş olmak üzere iki farklı geçiş meydana gelebilir (Pankove, 1971; Mott ve Davis, 1979).

Direkt Bant Geçişi: Bir yarıiletkenin valans bandının üst sınırı ile iletkenlik bandının alt sınırı enerji-momentum uzayında aynı $\vec{k}$ değerinde ise direkt geçiş meydana gelir. Bu geçiş için valans bandındaki bir elektronun, iletkenlik bandına geçebilmesi için enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük olan bir fotonu soğurması gerekir. Bu durumda elektron valans bandından iletkenlik bandına geçer ve valans bandında bir hol oluşur. Direkt geçişte enerji ve momentum korunur.



Şekil 2.15. Bir yarıiletkende direkt bant geçişi (Pankove, 1971).

Şekil 2.15'te E_i elektronun ilk enerjisi, E_f elektronun son enerjisi olmak üzere enerjinin korunumu yasasından,

$$E_f = hv - E_i \quad (2.46)$$

yazılabilir. Parabolik bantlarda elektronlar için E_i ,

$$E_i = E_f - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir. Holler için ise E_i ,

$$E_i = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.48)$$

ile verilir. Denklem (2.47) ve Denklem (2.48), Denklem (2.46)'da yerine yazılırsa,

$$\hbar\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.49)$$

bağıntısı elde edilir. Direkt geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa soğurma katsayısı α , gelen fotonun enerjisine,

$$\alpha(\hbar\nu) = A^* (\hbar\nu - E_g)^n \quad (2.50)$$

ifadesiyle bağlıdır. Burada A^* ,

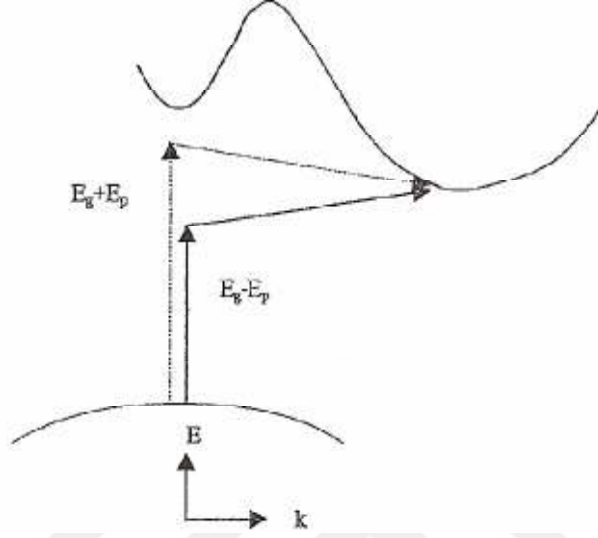
$$A^* \approx \frac{q^2 \left(2 \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*} \right)^{3/2}}{n_0 \hbar^2 m_e^*} \quad (2.51)$$

ifadesiyle verilen bir sabittir. Direkt bant geçişinde soğurma katsayısı ile fotonun enerjisi arasındaki bağıntı,

$$n_0 \alpha \hbar\nu \approx (\hbar\nu - E_g)^n \quad (2.52)$$

ile verilir. Burada n bir sabit ve n_0 ise kırılma indisidir. Bu denklemde n izinli direkt geçişler için 1/2, izinsiz direkt geçişler için 3/2 değerini alır (Pankove, 1971).

İndirekt Bant Geçişi: Bir yarıiletkenin valans bandının üst sınırı ile iletkenlik bandının alt sınırı enerji-momentum uzayında aynı $\vec{k}$ değerinde değil ise bu durumda indirekt geçiş meydana gelir.



Şekil 2.16. Bir yarıiletkende indirekt bant geçişi (Pankove, 1971).

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi, indirekt geçişte valans bandındaki bir elektronun iletkenlik bandına çıkabilmesi için fotonun yanında bir fononun soğurulması veya salınması gerekir (Pankove, 1971; Mott ve Davis, 1979; Kittel, 1996). Bu iki geçiş,

$$h\nu_a = E_f - E_i - E_p \text{ (Fonon soğurma durumu)} \quad (2.53)$$

$$h\nu_e = E_f - E_i \text{ (Fonon salınma durumu)} \quad (2.54)$$

ile verilir. Burada, E_p fonon enerjisidir.

Fonon soğurmalı geçiş için soğurma katsayısı, $h\nu > E_g - E_p$ için

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp\left[\frac{E_p}{kT}\right] - 1} \quad (2.55)$$

ile verilir. Fonon salınmalı geçiş için soğurma katsayısı, $h\nu > E_g + E_p$ için

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]} \quad (2.56)$$

ile verilir. Hem fonon soğurması hem de fonon salınması olduğu zaman α ile ν arasındaki bağıntı,

$$n_0 \alpha h\nu \approx \frac{(h\nu - E_g - E_p)^n}{\exp\left[\frac{E_p}{kT}\right] - 1} + \frac{(h\nu - E_g + E_p)^n}{1 - \exp\left[-\frac{E_p}{kT}\right]} \quad (2.57)$$

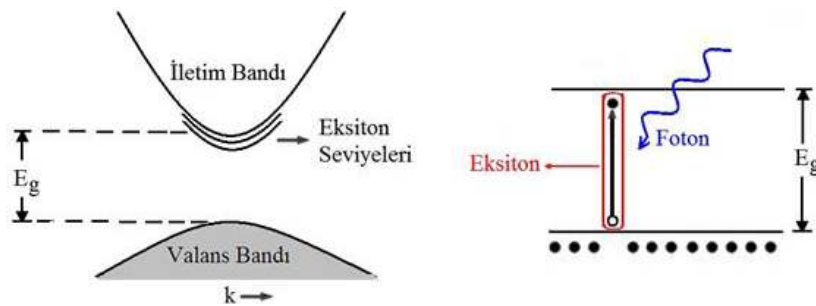
ile verilir. Burada; n, izinli indirekt geçişler için 2, yasaklı indirekt geçişler için 3 değerini alan bir sabiti göstermektedir (Pankove, 1971; Mott ve Davis, 1979).

2.4.1.2. Eksitonlar tarafından soğurma olayı

Yarıiletkenlerde bağlı bir elektronla hol birbirlerini Coulomb kuvvetiyle çekerler ve birbirlerinin etrafında dönerler. Bu şekilde oluşan elektron-hol çiftine “eksiton” denir (Şekil 2.17). Eksitonların bulunduğu enerji seviyesi, iletim bandının hemen altında yer alır. Eksitonlar tarafından soğurma olayı için;

$$h\nu \geq E_g - E_{eks} \quad (2.58)$$

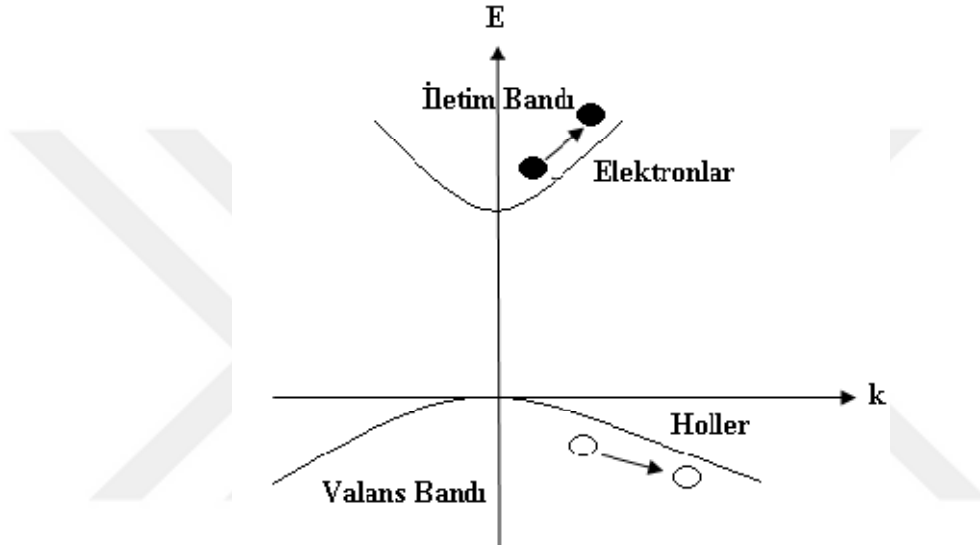
şartının sağlanması gerekir. Burada E_{eks} eksitonun bağlanma enerjisidir.



Şekil 2.17. Eksitonlar tarafından soğurma olayı.

2.4.1.3. Serbest yük taşıyıcıları tarafından soğurma olayı

Bir yarıiletken gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ya da küçük ise ($h\nu \leq E_g$), bu foton valans bandındaki bir hol ya da iletim bandındaki bir elektron tarafından soğurulabilir. Böylece serbest yük taşıyıcıları aynı bant içerisinde daha yüksek enerji seviyelerine uyarılırlar (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Serbest taşıyıcılar tarafından soğurma olayı.

2.4.1.4. Katkı atomları tarafından soğurma olayı

Bu soğurma olayı katkılı yarıiletkenlerde meydana gelir. Yarıiletken gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından daha küçük ($h\nu < E_g$) ise valans bandındaki elektronlar iletkenlik bandına geçemez. Fakat gelen foton yarıiletkenin tipine göre donör veya akseptör atomları tarafından soğurulursa bu olay “katkı atomlarının soğurması” olarak adlandırılır.

3. VAKUMDA İNCE FİLM ÜRETİM TEKNİKLERİ

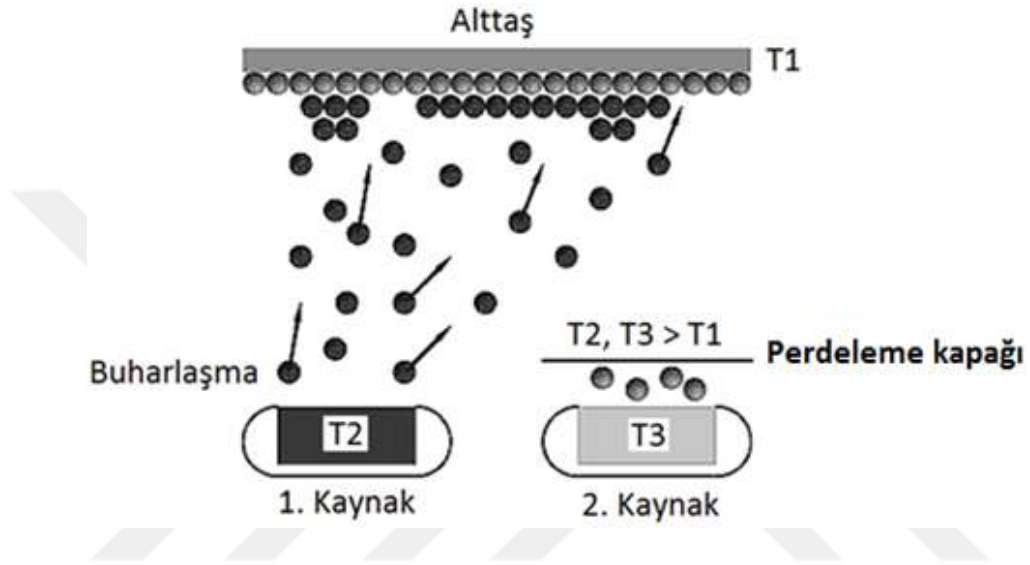
Türkçeye Fransızcadan geçmiş olan ve kökeni Latince boşluk anlamına gelen “vacuus” kelimesine dayanan “vakum” kelimesi gaz ortamında atmosfer basıncından daha düşük bir basıncın söz konusu olduğu durumu ifade etmek için kullanılmaktadır. Bir başka anlatımla vakum, ortamda, normal atmosfer basıncında bulunandan daha az gaz parçacığının bulunduğu durumdur. Vakum, çok geniş bir aralıktaki basınç değerlerini kapsar. Basınç aralıkları aşağıdaki gibi tanımlanabilir (TAEK, 2009):

Alçak vakum	760-25 Torr
Orta vakum	$25 \cdot 10^{-3}$ Torr
Yüksek vakum	$10^{-3} \cdot 10^{-6}$ Torr
Çok yüksek vakum	$10^{-6} \cdot 10^{-9}$ Torr
Ultra yüksek vakum	$< 10^{-9}$ Torr

Vakum altında yapılan ince film üretim işlemlerinin tümünde ön vakum ve çalışma basıncı koşullarının sağlanabilmesi amacıyla çok kademeli vakumlama ünitelerine ihtiyaç vardır. Bu tip vakum sistemleri temel olarak bir veya daha fazla mekanik ön pompadan ve bir ana pompadan meydana gelmektedir. Ana pompa olarak çoğu sistemde genellikle difüzyon pompaları tercih edilmektedir. Kaplama malzemelerinin buharlaştırılarak ya da ortama sıçratılarak altta yüzeyinde yoğunlaştırılması bilhassa vakum teknolojisindeki gelişmelerle birlikte ortaya çıkmış ve kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu işlemlerin ikisinde de elde edilecek vakumun kalitesi doğrudan doğruya filmin kalitesine etki etmektedir. Düşük basınç sadece buharlaşmayı kolaylaştırmanın ve ortamda bulunan başka gazlardan filme gelebilecek etkileri en aza indirmenin dışında buharlaşan parçacıkların enerjilerini kaybetmeden mesafe kat edebilmesi için de gereklidir. Normal koşullarda yüzeyden buharlaşan parçacıklar ortamdaki diğer parçacıklarla çarpışarak enerjilerini çok kısa mesafeler içinde yitirerek yoğunlaşmaktadır. Yüksek vakumlu ortamlarda ise buharlaşan parçacıklar çok uzun süre çarpışmadan yani enerji kaybetmeden hareket edebildiklerinden uygun mesafeler kat edebilmektedir (Keleşoğlu, 2011).

3.1. Termal Buharlaştırma Tekniği

Termal buharlaştırma tekniğinde, çeşitli ısıtma metotları kullanılarak ısıtılan bir materyal direkt olarak buharlaştırılır (Şekil 3.1). Sistem, buharlaştırma kaynağı ve kaynağı görebilecek uygun bir yere yerleştirilen alttaştan oluşur (Bunshah, 2001).



Şekil 3.1. Genel termal buharlaştırma mekanizması.

Alttaş üzerine kaplanacak materyalin sıvı veya katı fazdan buhar fazına geçmesi için gerekli olan ısıtma işlemini gerçekleştiren kaynaklara “buharlaştırma kaynakları” adı verilmektedir. Buharlaştırma kaynakları olarak geleneksel katı ve sıvı yakıtların kullanılması teknik açıdan mümkün değildir (ASM, 1992). Rezistans, indüksiyon, elektron demeti, lazer ve ark, buharlaştırma için mümkün olan kaynaklardır. Buharlaştırma işlemi genellikle yüksek vakumda gerçekleştirilir. Böylece atomlar çarpışmasız olarak taşınır ve buhar katı bir film olarak soğuk alttaş yüzeyinde yoğunlaşır. Birden çok buharlaştırma kaynağı kullanılarak farklı materyallerin ardışık olarak biriktirilmesi sağlanabilir. Sistemde, materyal ile alttaş arasında bulunan bir perdeleme kapağı yardımıyla film kalınlığı kontrol edilir. Kalınlık ölçmek için genellikle piezoelektrik etki ile çalışan kuartz kristal kullanılır.

Diğer vakumda kaplama teknikleri ile karşılaştırıldığında, termal buharlaştırmanın en büyük avantajı, ucuz, basit ve yüksek biriktirme hızına sahip olmasıdır. Dezavantajı ise, buharlaşan atomların düşük kinetik enerjileri nedeniyle kaplamanın yüzey tutunmasının düşük olmasıdır. Tutunmada bir miktar iyileşme, alttaşın kaplama sırasında ya da kaplamadan sonra ısıtılması ile difüzyona izin verilerek sağlanabilir.

3.1.1. Rezistans ile buharlaştırma

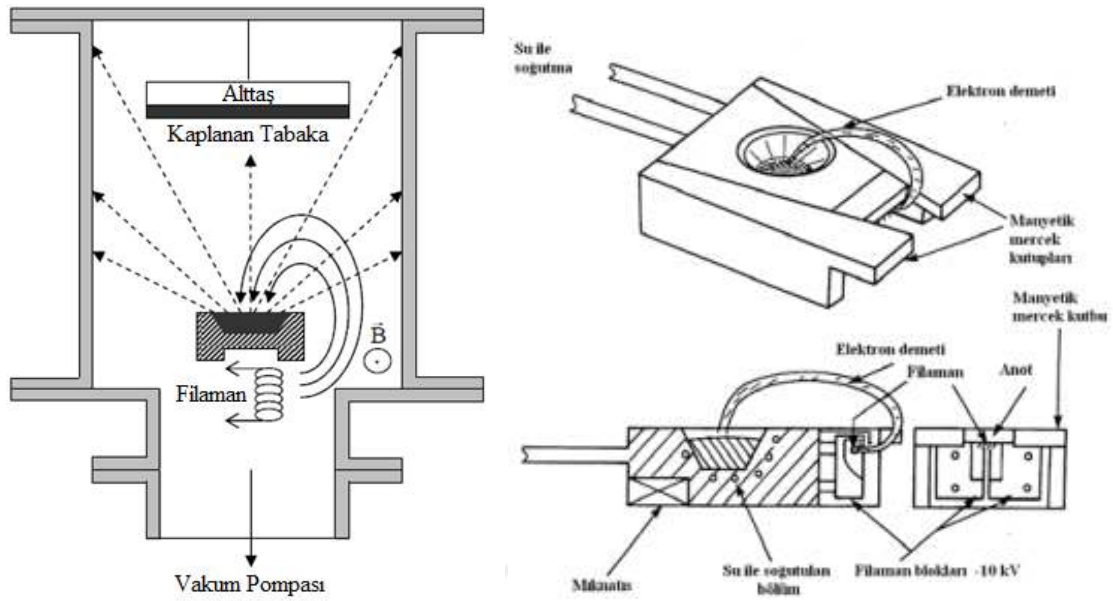
Rezistans ile buharlaştırma tekniğinde, alttaş üzerine kaplanmak istenen materyal refrakter bir pota içine yerleştirilir. Sistemde ısıtma, pota etrafına sarılmış rezistans teller ile sağlanır. Pota malzemesi olarak genellikle tungsten, molibden, tantal gibi malzemelerin kullanıldığı bu teknik alüminyum, magnezyum, gümüş, bakır, kurşun gibi düşük erime sıcaklığına sahip materyallerin buharlaştırılması için kullanılır.

3.1.2. İndüksiyon akımı ile buharlaştırma

Bu teknikte alttaş üzerine kaplanmak istenen materyalin buharlaşması pota etrafına sarılmış su soğutmalı bakır tellere uygulanan indüksiyon (RF) akımı ile sağlanmaktadır. Erime sıcaklığı 2100 °C'ye kadar olan materyallere uygulanabilen bu yöntem rezistans ile buharlaştırmaya göre daha yüksek maliyetlidir.

3.1.3. Elektron demeti ile buharlaştırma

Elektron demeti ile buharlaştırmada, buharlaştırılacak materyal su soğutmalı bir gövdenin içindeki potaya yerleştirilir. Pota içindeki materyal, pota altında bulunan bir filaman tarafından yayınlanan ve manyetik alanla yönlendirilen elektronlar ile bombardıman edilerek ısıtılır ve buharlaştırılır. Şekil 3.2, elektron demeti ile termal buharlaştırma sistemini şematize etmektedir.



Şekil 3.2. Elektron demeti ile termal buharlaştırma sisteminin şeması (Glocker vd., 1995).

Bu teknikte, elektronların yönlendirilmesinin kolaylığı ile yüzey taranarak buharlaştırma yapılabilir. Bu sayede farklı kalınlıkta kaplama oluşumu engellenmiş olur. Bir başka avantaj da elektron demetiyle yapılan buharlaştırma işleminde elektronların kısmen de olsa buhar fazını iyonize etmesidir (Keleşoğlu, 2011). Buharlaştırılan materyallerin erime sıcaklığıyla ilgili bir kısıtlama olmadığı için, bu teknik her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir.

3.1.4. Lazer ile buharlaştırma

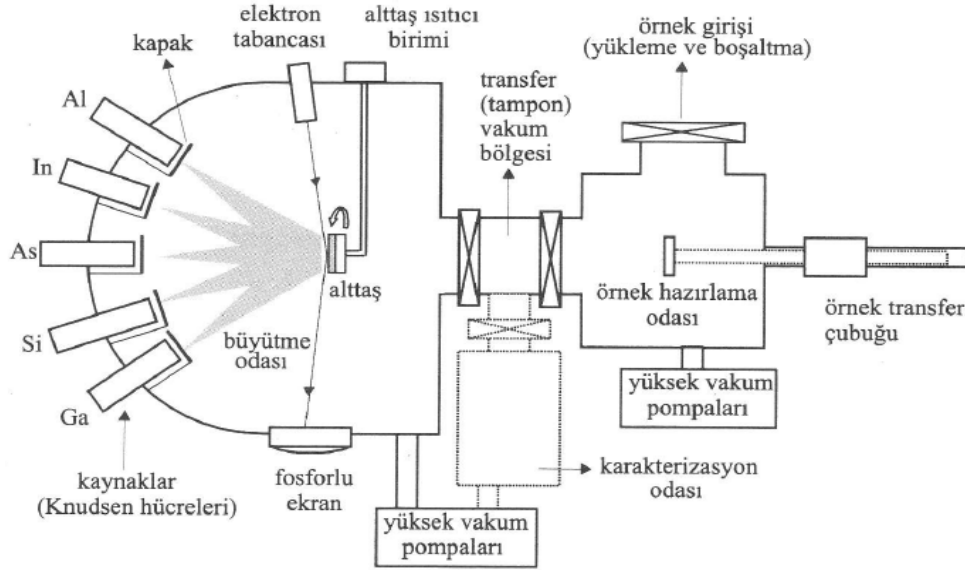
Lazer ile buharlaştırma tekniğinde, hedef materyal vakum ortamında lazer kullanılarak buharlaştırılır ve alttaş üzerine biriktirilir. Buharlaştırılacak materyalin soğurma karakteristiği, kullanılacak lazerin dalga boyunu belirlemektedir. Bu teknik ile lazer ışınını soğurabilen yüksek erime sıcaklığına sahip metaller buharlaştırılabilmektedir. Üretilen filmin özellikleri, lazer dalgaboyu, darbe süresi, enerji yoğunluğu ve sistem geometrisi gibi bazı üretim parametrelerine bağlıdır (Ullrich vd., 1998).

3.1.5. Katodik ark ile buharlaştırma

Temel bir katodik ark buharlaştırma sistemi; vakum odası, kaynak olarak kullanılacak katot materyali, bir güç kaynağı ünitesi, vakum pompaları, alttaş (anot) ve alttaşa uygulanacak bias voltajı güç kaynağından oluşmaktadır. Uygulamada, buharlaştırılacak materyal ve vakum odasının duvarları arasına düşük voltaj (20-30V) yüksek akım (100-200A) özelliğine sahip bir potansiyel uygulanır. Başlangıçta, tetikleme ile kısa devre yapılarak, anot ile katot arasında akım geçişi oluşturulur (Evcin, 2006). Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği “ark izi” ya da “katot izi” olarak adlandırılan noktalarda, sıcaklığın çok yüksek değerlere (yaklaşık 2500 °C) ulaşması, bu noktalarda erime ve buharlaşmalara neden olur (Lindfords vd., 1986; Sanders ve Anders, 2000). Katot üzerinde arkın olduğu noktalar sabit değildir ve hızla yer değiştirirler. Böylece katodun homojen olarak buharlaşması sağlanır. Oluşan buhar fazı, katot önünde yüksek elektron yoğunluğunun olduğu bölgede çarpışmalara maruz kalarak, hızlı bir şekilde iyonize olur ve oluşan iyonlar, homojen olmayan potansiyel dağılımı ve plazma genişmesi nedeniyle bu bölgeden hızlı bir şekilde taşınır. Negatif bias voltajı uygulanmış alttaşa doğru yönlendirilen iyonlar alttaş üzerinde biriktirilirler. Katodik ark ile buharlaştırma tekniği yüksek buharlaştırma verimi, metalik partiküllerin %100’e varan seviyelerde iyonizasyonu ve iyonların yüksek kinetik enerjiye (40-100 eV) sahip olması gibi önemli avantajlara sahiptir. Tekniğin en önemli dezavantajı, film yapısında makroparçacıkların oluşmasıdır (Vyskocil ve Musil, 1990). Makroparçacıkların oluşum sebebi ise katot üzerinde arkın olduğu noktaların aşırı ısınması sonucu “droplet” adı verilen metal damlacıklarının alttaş yüzeyine taşınmasıdır.

3.1.6. Moleküler demet epitaksi tekniği

Moleküler demet epitaksi (Molecular beam epitaxy, MBE), ultra yüksek vakum ortamında gerçekleştirilen, film kalınlığının çok hassas bir şekilde kontrol edilebildiği, oldukça gelişmiş, bir tek kristal büyütme tekniğidir. Termal Knudsen kaynaklarında çok yüksek saflıktaki elementlerin buharlaştırılmasıyla üretilen moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır.

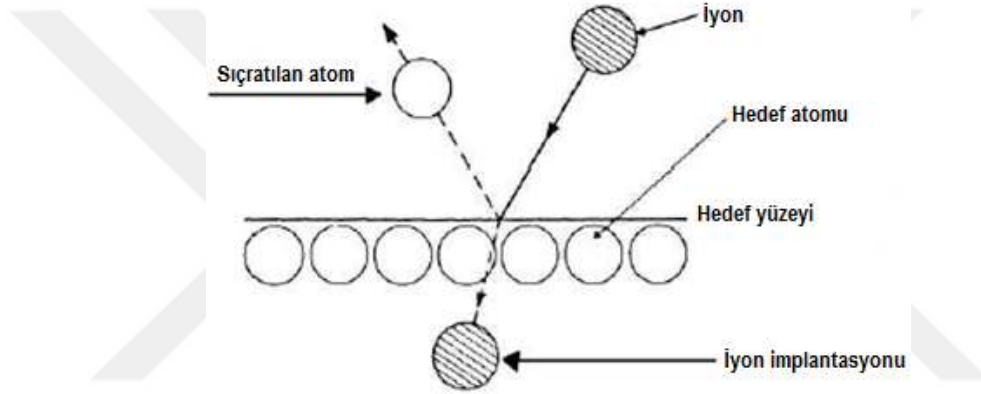


Şekil 3.3. Moleküler demet epitaksi sisteminin şeması (Tarımcı ve Sarı., 2006).

Şekil 3.3'ten görülebileceği üzere sıcaklıkları ayrı ayrı ayarlanabilen termal kaynaklar, büyütülecek filmin homojenliğini sağlayabilmek amacıyla alttaşın karşısına, uygun bir geometride yerleştirilmiştir. Büyütme işlemi sırasında alttaşın döndürülmesi de aynı zamanda homojen bir film elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Büyütülen filmin istenilen kalınlıkta olabilmesi için ise kaynaklar ve alttaş arasında mekanik kapaklar (kaynak kesicileri) bulunmaktadır. Bu kapakların bilgisayar kontrollü olarak açılıp kapanma süreleri yaklaşık 0,1 s'dir. MBE tekniğinde, biriktirme hızının düşük olması hedeflenir. Bu düşük biriktirme hızı, film bileşimini ve katkı atomu oranını ayarlayabilme imkânını sunar. Diğer buharlaştırma tekniklerinde bunu sağlamak neredeyse imkânsızdır. MBE sisteminin diğer sistemlere karşı bir diğer önemli üstünlüğü ise, biriktirme hızını ve yüzey morfolojisini işlem sırasında kontrol etmeye yarayan yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı (RHEED) sistemine sahip olmasıdır. Bu avantajlara karşılık MBE sistemlerinde kullanılan yüksek vakum pompalarının film büyütme işlemi yapılmadığı durumlarda da sürekli çalıştırılması gerekir. Bu da yüksek kurulum maliyetinin dışında sistemin işletilmesinin de oldukça masraflı olmasına neden olmaktadır. Ayrıca tekniğin düşük biriktirme hızından dolayı seri üretim için ideal olmayışı bir diğer olumsuzluktur (Tarımcı ve Sarı., 2006).

3.2. Sıçratma Tekniği

Sıçratma tekniğinde, hedef materyal, atomik boyutlardaki yüksek enerjili parçacıklar tarafından bombardıman edilerek, yüzeyden enerji ve momentum transferi ile fiziksel olarak atomlar koparılmakta ve kopan bu atomlar ince bir tabaka halinde alttaş üzerinde biriktirilmektedir (Mattox, 1998). Bombardımanı gerçekleştiren yüksek enerjili parçacıklar, genellikle elektrik alanda hızlandırılmış, ağır bir soy gazın pozitif iyonlarıdır (Mattox, 1998). Şekil 3.4'te fiziksel sıçratma olayı şematik olarak gösterilmektedir.

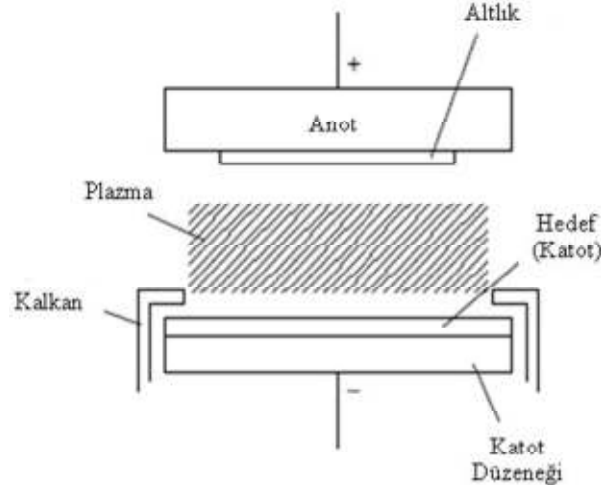


Şekil 3.4. Fiziksel sıçratma olayı.

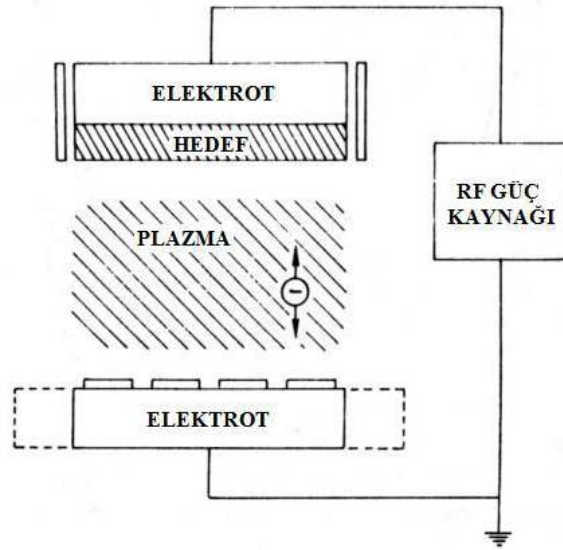
Periyodik tabloda bulunan elementlerin neredeyse tamamı sıçratma tekniği ile alttaşlar üzerine biriktirilebilmektedir. Sıçratma tekniğinin en önemli avantajı, biriktirilen filmlerin hedef malzeme ile aynı kompozisyona sahip olma eğilimi göstermesidir (Bunshah, 1994). Alaşımlar ve bileşikler de sıçratma işlemine tabi tutularak kompozisyonları korunacak şekilde film oluşturabilmektedirler. Sıçratma işleminde soy gaz kullanımıyla kaplama materyali direkt birikeceği gibi, reaktif bir gazın sisteme eklenmesiyle alttaş üzerinde hedef malzemenin sülfürleri, nitrürleri ve oksitleri gibi çeşitli bileşikler de biriktirilebilir (Kelly ve Arnell, 2000). Sıçratma tekniği beş farklı kategoride incelenebilir. Bunlar; 1) Diyot sıçratma, 2) Triyot sıçratma, 3) Magnetron (manyetik alanda) sıçratma, 4) Reaktif sıçratma, 5) İyon demeti ile sıçratma olarak sıralanabilir.

3.2.1. Diyet sıçratma tekniği

Sıçratma işlemi düşük basınçlarda ve soygaz atmosferinde gerçekleştirilir. Sistem, vakum odası içerisinde bir çift düzlemsel elektrottan meydana gelmektedir. Bunlardan bir tanesi katot, diğeri anottur. Sıçratılacak olan hedef materyal katoda yerleştirilir. Alttaşlar ise anodun üzerine yerleştirilir. Katodun arka yüzeyi su soğutmalı olarak tasarlanır. Anot ise ısıtmalı olabilir (Wasa ve Hayakawa, 1992). Hedef materyal ve alttaşlar vakum odası içerisine karşılıklı olarak yerleştirildikten sonra, basıncı 10^{-4} ile 10^{-7} Torr arasında değişen bir vakum ortamı oluşturulmaktadır. Bombardıman amacıyla kullanılan iyonlar çoğunlukla argon gazından elde edilmektedir. Çünkü argon, neon veya helyum gibi soy gazlardan daha ağırdır ve iyonize olması daha kolaydır. Argon gazı vakum odasına vakumlama işleminden sonra girmekte ve içerideki basıncı 10^{-3} ile 10^{-1} Torr arasında değişen değerlere getirmektedir. Sisteme argon gazının verilmesinin akabinde elektrotlar arasına birkaç kV'luk gerilim uygulanarak elektrik deşarjı oluşturulup ortamdaki argonların iyonizasyonu sağlanır ve plazma oluşturulur. Katoda uygulanan negatif voltaj sayesinde argon iyonları hızla hedefe çarptırılır. Hedef materyalin bu şekilde bombardımanı sayesinde yüzeyden atomlar koparılır. Hedeften atomların koparılması ile birlikte plazmayı devam ettirecek ikincil elektronlar da oluşmaktadır. Bu şekilde tasarlanan bir sistem “düzlemsel diyet sıçratma sistemi” olarak isimlendirilmektedir. Bu sistemde kaplama materyali iletken ise deşarj oluşturmak için doğru akım (DC) kullanılabilir (Şekil 3.5). Bu tekniğe “DC diyet sıçratma tekniği” denilmektedir (Wasa ve Hayakawa, 1992). Ne var ki, DC diyet sıçratma tekniği, sadece iletken materyalleri biriktirmek amacıyla kullanılabilir. Zira bu teknikte, yalıtkan hedef kullanıldığında yükler hedefin üzerinde yığılmak suretiyle sıçratma işleminin çok çabuk sona ermesine neden olmaktadır (Mattox, 1998; Seshan, 2002). Bu zorluğu aşabilmek amacıyla “radyo frekans (diyet) sıçratma” adı verilen teknik kullanılmaktadır (Şekil 3.6). Bu teknik, iletken, yarıiletken ve yalıtkan ince filmlerin biriktirilmesine imkân tanımaktadır. İşlem sırasında uygulanan akımın RF olması, katot yüzeyindeki yükün 13.56 MHz frekansla işaret (+,-) değiştirmesini sağlayarak yalıtkan malzemelerdeki yüklenme problemini önlemiş olur.



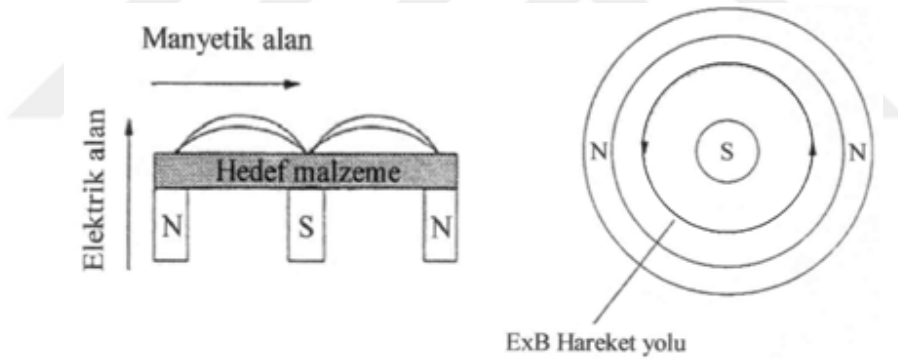
Şekil 3.5. DC diyot sıçratma sistemi (Tracton, 2006).



Şekil 3.6. RF diyot sıçratma sistemi (Bunshah, 1994).

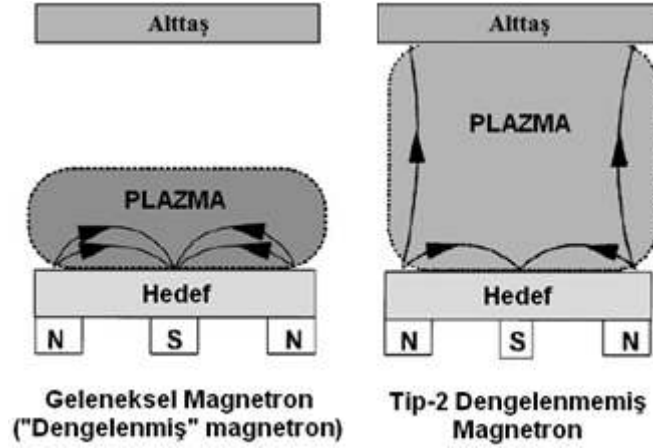
Diyot sıçratma yönteminin avantajı kaplama materyalinin etkin olarak kullanılmasıdır. Çünkü diyot elektrotlar büyüktür ve elektrotlar arasındaki elektrik alanı her bölgede aynı şekildedir. Kaplama materyali üzerine gelen iyon akısı neredeyse sabittir. Tekniğin en büyük dezavantajı ikincil elektronların etkin olarak kullanılmamasıdır. Diğer sıçratma tekniklerine kıyasla düşük çalışma basınçlarında daha düşük biriktirme hızına sahiptir (Vossen ve Kerner, 1991).

Manyetik alanda sıçratma tekniğinde hedef, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilir. Mıknatısın bir kutbu kaplama materyalinin merkez eksenine, ikinci kutbu kaplama materyalinin kenarlarına yerleştirilmiştir. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların kaplama materyalinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlamaktadır. Plazmadaki elektronlar $E \times B$ yönünde hareket ederler. Başka bir deyişle, elektronların hareketi hem elektrik alana (E) hem de manyetik alana (B) dik yöndedir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi elektronların $E \times B$ yönündeki hareket yolu, kaplama malzemesinin yüzeyine paraleldir ve kapalı halka oluşturur. Böylece iyon bombardımanı ile katot yüzeyinden yayınan ikincil elektronlar, bu bölgede özellikle tutularak iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olur bu da kaplama hızını arttırıcı bir etkindir. Ayrıca iyonizasyonun artması ile daha düşük basınç ve gerilim değerlerinde çalışılması mümkün hale gelir.



Şekil 3.8. Dairesel düzenli manyetik alan şekli ve hareket yolu (Cansever, 2001).

Manyetik alanda sıçratma, dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratma olmak üzere ikiye ayrılır. Bu teknikler temelde aynı olmasına rağmen, hedef önünde oluşturulan plazmanın kapanma şeklinde meydana gelen farklılık ile birbirinden ayrılmaktadır. Dengeli manyetik alanda sıçratma tekniğinde, kaplama materyalinin ön kısmında yoğun plazma oluşturulur. Dengesiz manyetik alan tekniğinde ise, manyetik alanın dış mıknatısları, merkezdeki mıknatısa göre daha kuvvetli seçilerek plazmanın alttaşa kadar ulaşması sağlanır. Dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratma şematik olarak Şekil 3.9’da görülmektedir.



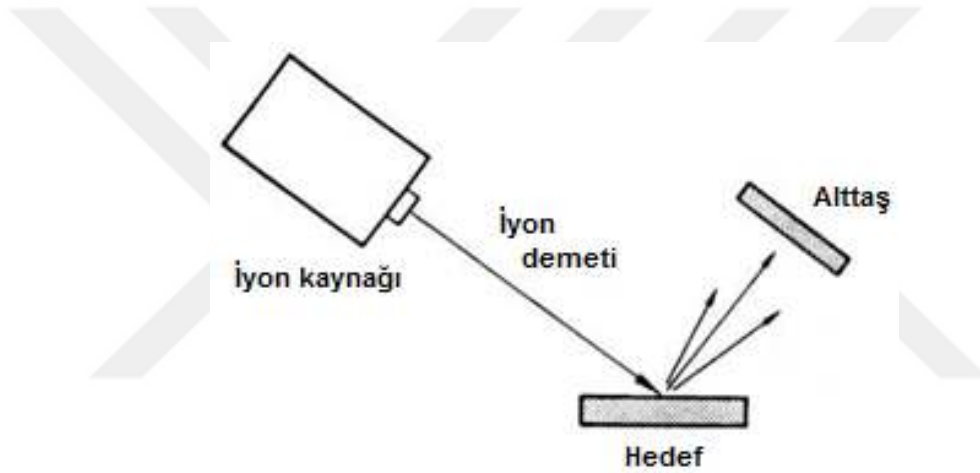
Şekil 3.9. Dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratmada plazma kapanmasının karşılaştırılması (Kelly ve Arnell, 2000).

3.2.4. Reaktif sıçratma tekniği

Vakum odasına soy gaz ile birlikte, hedef materyal ile kimyasal olarak etkileşebilecek bir reaktif gaz da gönderilirse, bu teknik “reaktif sıçratma tekniği” olarak isimlendirilir. Bu reaktif gazlar genellikle düşük ağırlıklara sahip O_2 , N_2 , C_2H_2 gibi gazlardır. Sisteme reaktif gazların verilmesi ile birlikte oksitler, nitrürler, sülfürler, karbürler, karbonitrürler, oksinitrürler vb. gibi biriktirilecek filmlerin çeşitliliği artırılabilir (Bunshah, 1994). Reaksiyonlar hedef materyalinin yüzeyinde gerçekleşebileceği gibi, sıçratılmış atomların altta ulaşması esnasında ve altta üzerinde gerçekleşebilmektedir (Seshan, 2002). Hedef materyalin kirlenmesi reaktif sıçratma tekniğinde en sık karşılaşılan sorunlardan biridir ve sıçratma hızını ve verimini önemli ölçüde düşürür. Manyetik alanda sıçratma gibi yüksek hızlı sıçratma yapılarak ve ortamdaki reaktif gazın miktarı kontrol altında tutularak bu sorunun önüne geçilebilmektedir (Mattox, 1998).

3.2.5. İyon demeti ile sıçratma tekniği

İyon demeti ile sıçratma tekniğinde, ayrı bir iyon kaynağından elde edilen iyon demetinin kaplama materyalini bombardımanı ile materyalin atomları yüzeyden sıçratılmakta ve alttaş üzerine biriktirilmektedir. En sık kullanılan iyon kaynakları Kaufman kaynağı ve Duoplasmatron'dur. Duoplasmatron kullanılagelen en eski iyon kaynağı olup iyonlar ark deşarjı ile oluşturulmaktadır. Son yıllarda ise Kaufman iyon kaynağı sıkça kullanılmaktadır. Sıcak filaman katoda sahip Kaufman iyon kaynağında iyonlar plazma oluşturularak üretilmektedir (Wasa ve Hayakawa, 1992).



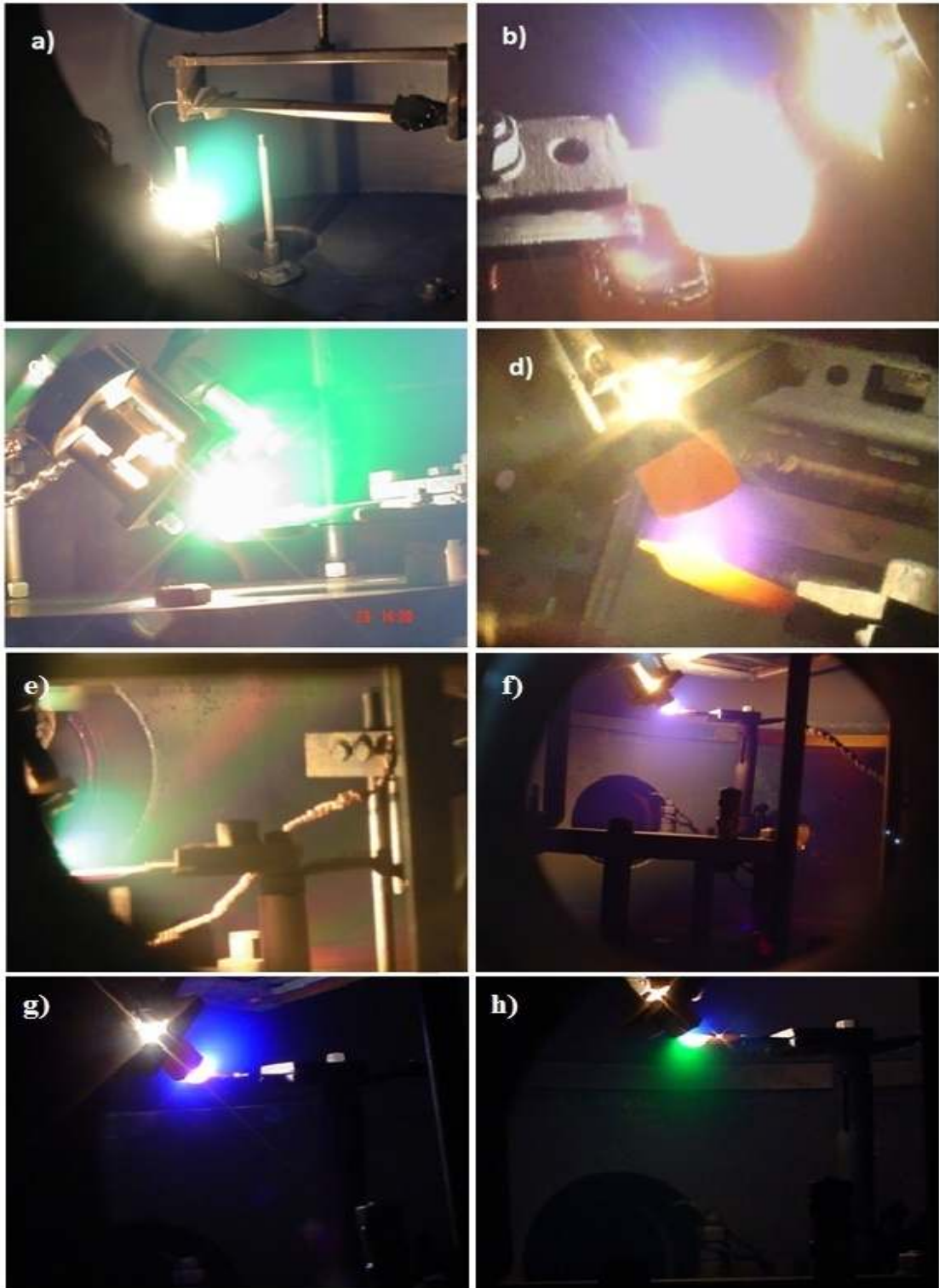
Şekil 3.10. İyon demeti ile sıçratma yöntemi (Bunshah, 1994).

Şekil 3.10'da şematik olarak görüldüğü gibi iyon kaynağından belirli bir açı, enerji ve akım yoğunluğunda malzeme yüzeyine iyonlar gönderilir, alttaş ise sıçratılan atomları toplayacak şekilde yerleştirilir. Tekniğin en önemli avantajı bombardımanda kullanılan iyonların enerji ve akım yoğunluğunun sistemden bağımsız olarak kontrol edilebilmesidir. İyon demeti ile sıçratma yöntemin dezavantajı ise iyon demetinin çapının küçük olması ve bundan dolayı biriktirme hızının düşük olmasıdır. Bu yöntem diğer sıçratma yöntemleri gibi geniş alanlarda kaplama imkânı sağlamaz, daha çok laboratuvar ölçekli çalışmalarda kullanıma uygundur (Bunshah, 1994).

4. TERMİYONİK VAKUM ARK

Termiyonik Vakum Ark (TVA), yüksek vakumda ($\sim 10^{-6}$ Torr) saf anot metali plazmasının üretilmesi için 1983 yılında Bükreş/ROMANYA’da bulunan Ulusal Lazer, Plazma ve Radyasyon Fiziği Enstitüsü’nün bir alt birimi olan Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Laboratuvarı çalışanları tarafından geliştirilmiş bir vakum ark tekniğidir (Musa vd., 1983). Bu teknikte anot içine yerleştirilen metal, katot tarafından üretilen elektronlarla bombardıman edilmektedir. Katottan yayınlanan elektronlar, anot üzerine Wehnelt silindiri ile odaklanmakta ve elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj ile hızlandırılmaktadır. Elektronlar tarafından anot üzerine aktarılan enerji, anot içinde bulunan metalin erimesini ve sürekli bir şekilde buharlaşmasını sağlar. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırılırsa, uygun bir değerde elektrotlar arası uzayda anot materyali buharında parlak bir deşarj oluşur. TVA’da bir tampon gaz kullanılmadığı için oluşan deşarj saf metal buharı deşarjı olmaktadır.

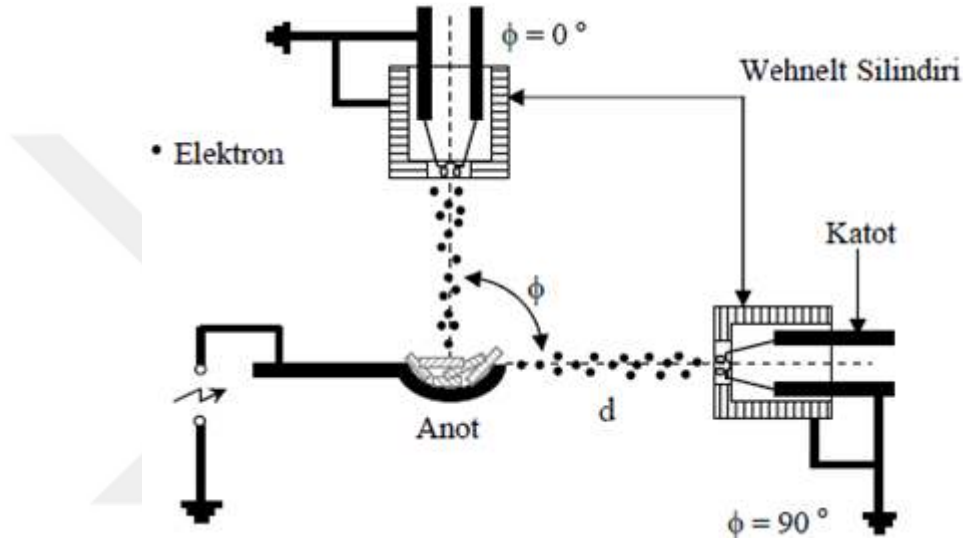
Romanya’da iki ve Türkiye’de de bir araştırma grubu tarafından TVA’nın araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmaları sürdürülmekte ve elde edilen sonuçlar literatürde yayınlanmaktadır. 30 yılı aşkın AR-GE faaliyetleri neticesinde TVA oldukça geliştirilerek günümüzde sadece metallerin değil; seramik, alaşım, yarıiletken, süperiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasını üretebilen bir teknik haline gelmiştir. TVA ile yapılan çalışmalar ülkemizde Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Plazma Fiziği ve Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında 1998 yılından itibaren devam etmektedir. Şu anda bu laboratuvarında iki adet TVA sistemi bulunmaktadır. Bu sistemler ile şimdiye kadar gümüş, bor, silikon dioksit, zirkonyum dioksit, magnezyum, karbon, altın, çinko selenyum, çinko sülfür, magnezyum florür, kalsiyum florür, stronsiyum titanat, alüminyum florür, çinko oksit, silisyum germanyum, baryum florür, titanyum dioksit, alüminyum oksit gibi birçok materyalin plazması üretilmiştir (Pat vd., 2005; Pat, 2007; Balbağ vd., 2007; Balbağ vd., 2010; Pat vd., 2010; Balbağ ve Pat, 2011; Pat vd., 2011; Korkmaz vd., 2012a; Korkmaz vd., 2012b; Özkan vd., 2012a; Özkan vd., 2012b; Çetin vd., 2013; Pat vd., 2013; Pat vd., 2014a; Pat vd., 2014b; Pat vd., 2014c; Özen vd., 2015b; Pat vd., 2015b; Şenay vd., 2015a; Şenay vd., 2016a). Şekil 4.1’de bazı materyallerin TVA ile oluşturulan plazmaları görülmektedir.



Şekil 4.1. TVA tekniği ile oluşturulan a) bakır (Cu), b) bor (B), c) magnezyum (Mg), d) çinko oksit (ZnO) e) magnezyum florür (MgF₂) f) alüminyum (Al) g) çinko sülfür (ZnS) h) silisyum germanyum (SiGe) plazmaları.

4.1. TVA’da Elektrotların Düzenlenişi

TVA sistemi temel olarak, son basıncı yaklaşık 10^{-6} Torr olan bir vakum odası içinde anot ve katot olarak isimlendirilen ve birbirlerine göre farklı konumlara getirilebilen iki elektrottan oluşur. Bu elektrotların düzenlenişi farklı iki pozisyonda ($\phi=0^\circ$ ve $\phi=90^\circ$) şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

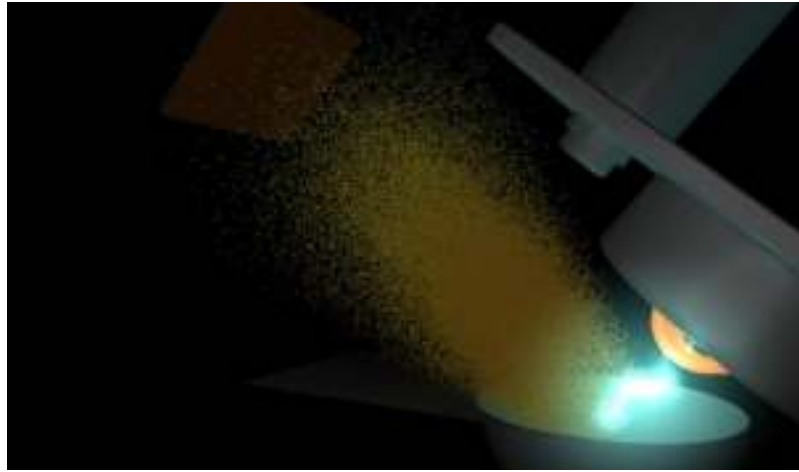


Şekil 4.2. TVA’nın elektrotlarının düzenlenişi.

Anot, buharlaştırılarak plazması elde edilecek materyalin içine koyulduğu bir pota, katot ise üzerinden akım geçirilerek ısıtıldığında termiyonik emisyon yapan bir filamandır. Bu filaman, elektron demetini anot üzerine odaklamak amacıyla elektrostatik mercek görevi yapan bir Wehnelt silindirisinin içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.2’de Wehnelt silindirisinin ucu ile materyal arasındaki mesafe anotla katot arasındaki uzaklığı ifade eder ve d ile simgelenir. ϕ ise elektron tabancasından çıkan elektron demetinin doğrultusu ile kaplanacak materyalden indirilen düşey eksen arasındaki açıdır. Elektrotlar arasındaki mesafe d , açı ϕ , çalışma basıncı P , filaman ısıtma akımı I_f ve işlem süresi t , TVA’da önemli parametrelerdir.

4.2. TVA Tekniği ile İnce Film Üretimi

Plazması elde edilecek materyal anot içine koyulup, elektrotlar düzenlendikten sonra vakum odası vakumlanır. 10^{-6} Torr civarındaki bir basınç değere ulaşılnca, bir düşük voltaj güç kaynağı ile filaman üzerinden akım geçirilerek filamanın ısınması ve termiyonik emisyon yapması sağlanır. Filamandan elektron emisyonu devam ederken anot ve katot arasına yüksek voltaj uygulanır. Uygulanan bu yüksek voltaj, Wehnelt silindiri yardımıyla, katottan yayınlanan elektronların anot içinde bulunan materyal üzerine odaklanmış bir şekilde hızlandırılmasını sağlar. Anot üzerine odaklanarak hızlandırılan elektronların bombardımanı nedeniyle anot içindeki materyale enerji aktarılır ve bu enerji ile materyal ısınır. Elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltajın arttırılması ile anot içindeki materyalin erimesi ve daha sonra kaynayarak buharlaşması sağlanır. Yüksek voltaj daha da arttırılırsa, belirli bir değere ulaşıldığında elektrotlar arası ortamda, anot materyali atomlarının belirli bir nötral atom yoğunluğunda, katottan elektron emisyonunun devam etmesi sebebiyle parlak bir deşarj oluşur. Bu sırada elektrotlar arasında ölçülen voltaj aniden düşer, akım ise birden yükselir. Oluşan plazma anot üzerinden sürekli bir şekilde vakum odasının duvarlarına doğru yayılır. Vakum odası içerisinde uygun bir yere yerleştirilen alttaşlar anot materyali cinsinden kaplanır (Musa vd., 1994; Musa vd., 1997; Ehrich vd., 1998; Musa vd., 2003; Musa vd., 2004; Vladioiu vd., 2007; Özen vd., 2015c; Özen vd., 2015d; Özen vd., 2015e; Şenay vd., 2015b). Şekil 4.3'te TVA tekniği ile ince film üretimi gösterilmektedir.

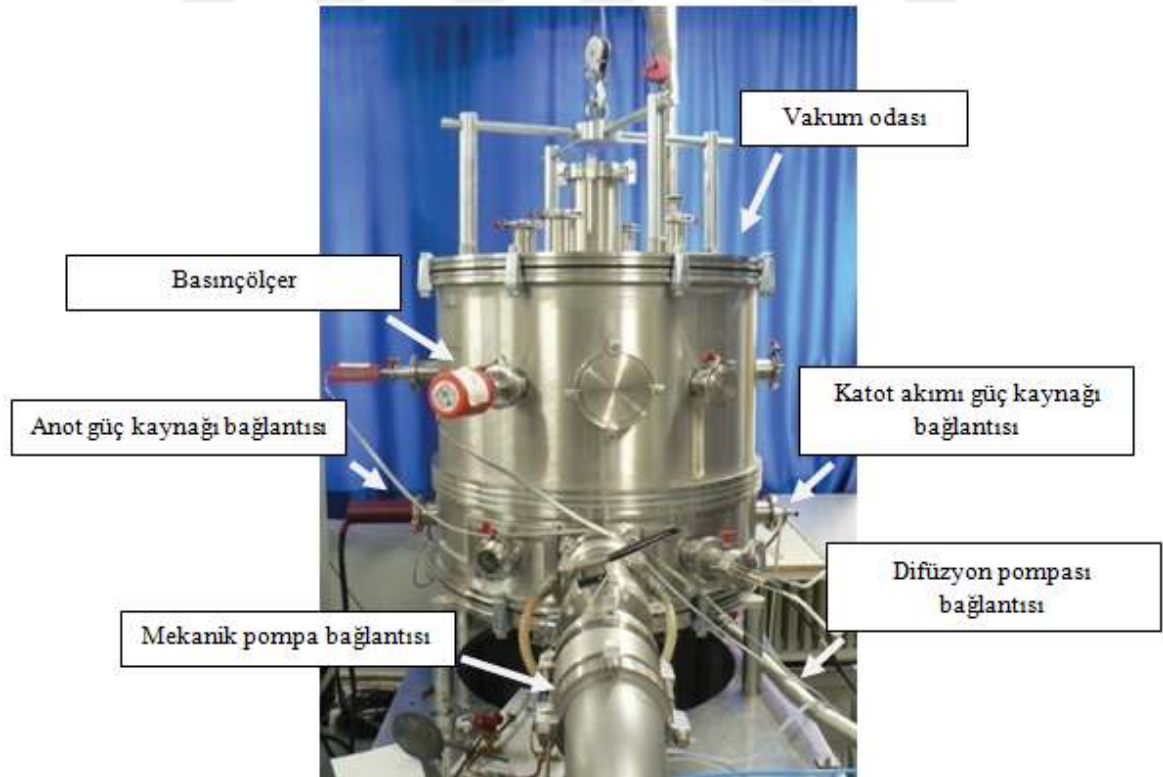


Şekil 4.3. TVA tekniği ile ince film üretimi.

4.3. İnce Film Üretiminde TVA Tekniğinin Avantajları

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, TVA ile üretilen ince filmlerin yüksek saflıkta, son derece yoğun, yüzey tutunmalarının oldukça yüksek, yüzey pürüzlülüklerinin ise düşük olduğu görülmüştür (Pat vd., 2005; Ekem vd., 2008; Balbağ, 2009). TVA’da bir iyon hızlandırıcı cihaz kullanılmadan çalışma parametreleri kontrol edilerek kaplanacak materyalin iyonlarının enerjileri değiştirilebilmekte; bu sayede filmin alttaş üzerindeki difüzyon derinliği ayarlanabilmektedir (Vladoiu vd., 2003; Pat vd., 2005). TVA ile çok yüksek erime sıcaklığına sahip olan metaryallerin ince filmleri üretilebilmekte ve plastik dahil hemen her malzeme alttaş olarak kullanılabilir (Musa vd., 1984; Surdu vd., 2007; Musa vd., 2007; Vladoiu vd., 2007; Lungu vd., 2006; Vladoiu vd., 2006; Lungu vd., 2005; Musa vd., 2005; Lungu vd., 2004; Musa vd., 2004).

4.4. TVA Sisteminin Bileşenleri



Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan TVA sisteminin fotoğrafı.

Şekil 4.4'te fotoğrafı gösterilen ve bu çalışmada katkılı ve katkısız GaAs ince filmlerin üretiminde kullanılan TVA sistemi dokuz ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler:

1. Vakum odası,
2. Anot,
3. Katot,
4. Katot akımı ve anot potansiyeli güç kaynakları,
5. Vakumlama sistemi,
6. Basınç ölçüm sistemi,
7. Amperetreler ve voltmetreler sistemi,
8. İnce film kalınlık kontrol cihazı,
9. Soğutma sistemi'dir.

4.4.1. Vakum odası

TVA sisteminin silindirik vakum odası 70 cm çapında ve 60 cm yüksekliğinde olup, ultra yüksek vakum değerlerinde çalışabilecek şekilde paslanmaz çelikten özel olarak imal edilmiştir. Vakum odasının üst kısmı, elektrikli bir vinç yardımıyla açılıp kapanmakta ve böylelikle taşınabilir bir tabla üzerine monte edilen elektrotlar ve üzerine film büyütülecek alttaşlar vakum odasının içine kolayca yerleştirilebilmektedir. Sızdırmazlık elemanları olarak ise viton, teflon o-ringler ve contalar kullanılmaktadır.

4.4.2. Anot

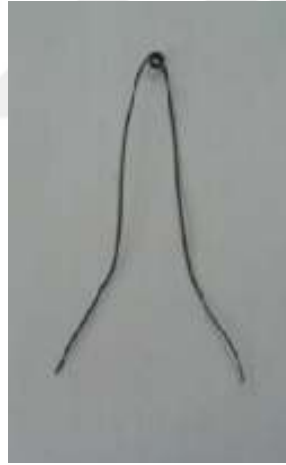
TVA'da anot, içine plazması oluşturulacak materyalin koyulduğu yüksek erime sıcaklığına sahip malzemeden yapılmış kaşık şeklinde bir potadır. Bu çalışmada erime sıcaklığı 3422 °C olan tungsten elementinden yapılmış potalar kullanılmıştır. Şekil 4.5'te tungsten bir potanın fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.5. TVA sisteminde kullanılan tungsten bir pota.

4.4.3. Katot

Katot, üzerinden akım geçirildiğinde termiyonik emisyon yapan bir filamandır. Bu filaman tungsten teller 1 mm çapındaki bir çubuk üzerine 4 kez sarılarak hazırlanmaktadır. Şekil 4.6’da 0,5 mm çapındaki tungsten telden hazırlanmış el yapımı bir filaman görülmektedir.



Şekil 4.6. 0,5 mm çaplı tungsten telden hazırlanmış el yapımı filaman.

Katot filamanı 12 mm çapında, 15 mm yüksekliğinde ve ön kısmında 5 mm çapında açıklık bulunan molibdenden yapılmış bir Wehnelt silindirin içine yerleştirilmiştir. Wehnelt silindirin içine yerleştirilen katot filamanının vakum odası dışından elektrik bağlantılarının yapıldığı mekanizmalarla birlikte düzenlenişine ise “elektron tabancası” ismi verilir. Şekil 4.7’de deneylerde kullanılan elektron tabancasının fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.7. İçinde katot filamanı bulunan elektron tabancası.

Anot potası ve elektron tabancası paslanmaz çelikten yapılmış taşınabilir bir tabla üzerine monte edilmiştir. Bu tabla üzerinde anot ile katot arasındaki uzaklık ve açı ayarlanıp daha sonra bu sistem vakum odasının içine kolayca yerleştirilebilmektedir. Elektrotlar düzenlenirken doğrudan ısıtılan filamentin bir ucu elektrotların monte edildiği tabla üzerine bağlanır. Bu tabla vakum odasının tabanına yerleştirildiği için ve vakum odası toprak hattına bağlı olduğundan, elektrotlar sisteminin monte edildiği tabla toprak potansiyelinde tutulur. Ancak anot, tabla üzerinden seramik yalıtıcı ile yalıtılır. Fakat Wehnelt silindiri elektron tabancasından dolayısıyla da tabla üzerinden yalıtılmaz. Böylece Wehnelt silindiri toprak potansiyelinde tutulur. Anot pozitif potansiyelde tutulurken Wehnelt silindirinin toprak potansiyelinde tutulması ile katottan yayınlanan elektronlar anot üzerine gönderilir. Katottan yayınlanan elektronlar, pozitif potansiyel tarafından çekilirken toprak potansiyelindeki Wehnelt silindiri tarafından itilecektir ve dolayısıyla anot üzerine odaklanacaklardır. TVA’da elektrotlar arasında oluşan plazma, katot potansiyelinden yani toprak potansiyelinden daha yüksek potansiyeldedir. Vakum odasının toprak hattına bağlı olması nedeni ile plazma, vakum odası içinde her yöne kolayca yayılabilmektedir. Böylece plazma içindeki iyonlar, ayrı bir yönlendirici ve hızlandırıcı kullanılmadan vakum odasının çeperlerine doğru yönlendirilmiş ve hızlandırılmış olmaktadır. Bu, TVA’yı iyon-destekli kaplama yapan diğer tekniklerden ayıran önemli bir özelliktir.

4.4.4. Katot akımı ve anot potansiyeli güç kaynakları

TVA sisteminde, katot filamanından termiyonik emisyon elde etmek için bir AC düşük voltaj güç kaynağı (12 V-200 A), elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulamak için ise bir DC yüksek voltaj güç kaynağı (10 kW, 0-5 kV) kullanılmaktadır.

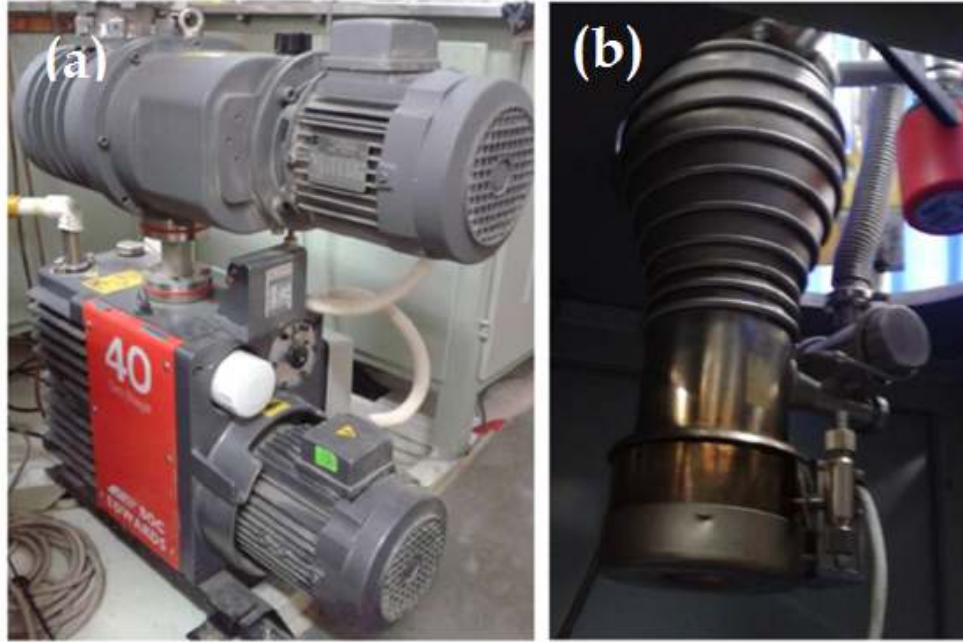


Şekil 4.8. Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı panosu.

Katot akımı güç kaynağı ve anot potansiyeli güç kaynağı Şekil 4.8’de görüldüğü gibi aynı pano üzerine yerleştirilmiştir. Pano üzerinde her iki kaynağın açma kapama düğmeleri, sigortaları ve uygulama voltajlarının kademe kademe arttırılabildiği varyakları bulunmaktadır.

4.4.5. Vakumlama sistemi

Vakumlama sistemi, bir mekanik pompa (Edwards E2M40/EH250) ve bir difüzyon pompasından (Edwards Diffstak 63/150) oluşmaktadır (Şekil 4.9a,b). Mekanik pompa ile vakum odasının basıncı 10^{-3} Torr'a kadar inmekte, daha sonra difüzyon pompasının devreye girmesiyle vakum odasının basıncı 10^{-6} Torr'a ulaşmaktadır.



Şekil 4.9. Vakumlama sistemini oluşturan mekanik pompa (a) ve difüzyon pompası (b).

4.4.6. Basınç ölçüm sistemi

Vakum odasının basıncı, bir düşük basınçölçer (Edwards Active Pirani Gauge APG-M) ve bir de daha düşük basınçölçer (Edwards Active Inverted Magnetron Gauge AIM-S) ile ölçülmektedir. Düşük basınçölçer 10^{-3} Torr'a kadar olan düşük basınçları, diğer basınçölçer ise 10^{-3} ile 10^{-6} Torr arasındaki daha düşük basınçları hassas olarak ölçebilmektedir. Her iki basınçölçer bir vakum aletleri kontrol cihazına (Edwards TIC Instrument Controller D39701000) bağlıdır. Bu kontrol cihazının bağlantılı olduğu bilgisayarın ekranında üretici firma tarafından sağlanan yazılım kullanılarak basınçölçerlerin ölçtükleri değerler ayrı ayrı gözlenebilmektedir.

4.4.7. Amperetreler ve voltmetreler sistemi

Yüksek akım ve yüksek voltaj değerlerinin ölçülebilmesi için uygun direnç eklemeleri yapılarak özel olarak tasarlanmış amperetre ve voltmetreler ile kaplanacak materyallerin termiyonik vakum arklarının oluşturduğu elektrotlar arasındaki iyon akımı, ateşleme voltajı ve voltaj düşümü değerleri ölçülebilmektedir. Ayrıca bir askı amperetre ile katot filamanı üzerinden geçirilen ısıtma akımı takip edilebilmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Amperetreler ve voltmetreler sistemi

4.4.8. İnce film kalınlık kontrol cihazı

Deneyler sırasında büyütülmekte olan filmlerin kalınlığını kontrol etmek amacıyla, altın kaplı kuartz kristalli, saniyede 5 ölçüm yapabilen, yüksek çözünürlüklü (0,1 nm) Sigma instruments kalınlık ölçer kullanılmaktadır.

4.4.9. Soğutma sistemi

Soğutma sistemi, vakum odasının dış yüzeyinde ve difüzyon pompasının üzerinde bulunan su soğutma ünitelerinden oluşmaktadır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın birinci aşamasında TVA ile katkılı ve katkısız GaAs ince filmler üretilmiştir. İkinci aşamada ise üretilen filmlerin bazı fiziksel özellikleri çeşitli karakterizasyon teknikleri ile incelenmiştir. Bu bölümde ise üretim ve karakterizasyon işlemlerinin deneysel detaylarına ve başvuru karakterizasyon tekniklerinin prensiplerine değinilecektir.

5.1. Katkılı ve Katkısız GaAs ince Filmlerin Üretimi

Bu çalışmada TVA tekniği ile yedi adet tek katmanlı katkılı ve katkısız GaAs ince film $76 \text{ mm} \times 26 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ölçülerindeki mikroskop camları üzerine yedi ayrı deney yapılarak üretilmiştir. İnce film üretiminde dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri temizliktir. Filmlerin kalitesi için alttaşların üzerinde toz, parmak izi ve yağ gibi herhangi bir kirlilik bulunmamalıdır. Bu yüzden standart olarak her deneyden önce, alttaş olarak kullanılan mikroskop camları, önce saf su daha sonra etil alkol ve son olarak yine saf su ile ultrasonik temizleme cihazında her bir aşama beş dakika sürecek şekilde yıkanmış daha sonra oda sıcaklığında altmış dakika kurumaya bırakılmıştır. Tamamen kuruyan alttaşlar vakum odası içindeki alttaş tutucuya yerleştirilmiştir.

5.1.1. Üretim parametreleri

Alttaşlar, her deneyde anot ile aralarında yaklaşık 80 mm mesafe olacak şekilde vakum odası içindeki alttaş tutucuya yerleştirilmiştir. Deneylerin hepsinde anot olarak tungsten pota, katot olarak ise tungsten telden yapılmış filaman kullanılmıştır. Deneylerde anot potasına koyulan kaynak malzemeleri ve miktarları Çizelge 5.1’de verilmektedir. Vakum odası vakumlanırken, 10^{-3} Torr ön vakuma kadar mekanik pompa kullanılmış, bu değere ulaşıldıktan sonra 10^{-5} Torr mertebesindeki nihai vakum değerlerine difüzyon pompası kullanılarak ulaşılmıştır. Çizelge 5.2’de üretim parametreleri özetlenmiştir. Burada d elektrotlar arası mesafe, ϕ elektrotlar arasındaki açı, P çalışma basıncı, I_f filaman ısıtma akımı, V_B ateşleme voltajı, V_D ark ateşlendikten sonra elektrotlar arasında ölçülen voltaj, I_D elektrotlar arasında oluşan deşarj akımı, t işlem süresidir.

Çizelge 5.1. Anot potasına koyulan kaynak malzemeleri ve miktarları.

Deney	Kaynak Materyali
1	0,25 g GaAs
2	0,09 g GaAs + 0,05 g Co
3	0,17 g GaAs + 0,02 g Al
4	0,25 g GaAs + 0,05 g In
5	0,13 g GaAs + 0,03 g C
6	0,13 g GaAs + 0,03 g Si
7	0,32 g GaAs + 0,16 g Ge

Çizelge 5.2. Üretim parametreleri.

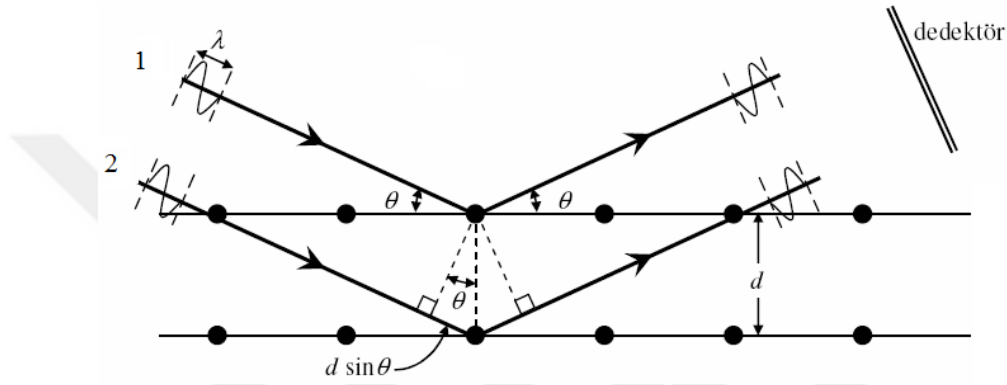
Deney	d (mm)	Φ (°)	P (Torr)	I_f (A)	V_B (V)	V_D (V)	I_D (A)	t (s)
1	4	45	7×10^{-5}	18	300	100	0,2	120
2	4	45	2×10^{-5}	18	500	150	0,4	60
3	4	45	2×10^{-5}	18	900	200	0,8	190
4	4	45	4×10^{-5}	18	500	150	0,5	75
5	4	45	3×10^{-5}	18	400	200	0,4	40
6	4	45	3×10^{-5}	18	600	150	0,5	50
7	4	45	5×10^{-5}	18	500	150	0,6	180

5.2. Üretilen Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Karakterizasyonu

Üretilen ince filmlerin yapısal özellikleri XRD kullanılarak incelenmiştir. Filmlerin yansıma spektrumlarını kaydetmek için spektroskopik reflektometre kullanılmıştır. Yansıma spektrumlarının spektral analizi ile filmlerin kalınlıkları ve optik sabitleri belirlenmiştir. Geçirgenlik ve soğurma spektrumları spektrofotometre ile kaydedilmiştir. Optik metot ile yasak enerji aralıkları hesaplanmıştır. İletkenlik tipleri ise sıcak uç metodu ile belirlenmiştir. Yüzey morfolojisini ve bileşimsel özelliklerini araştırmak için FESEM ve EDS kullanılmıştır. AFM ile film yüzeylerinin üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca Hall etkisi ölçüm sistemi kullanılarak elektriksel ölçümler gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. X-ışını kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal yapı analizinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Tekniğin temeli ise, atomik düzlemlerden yansıyan X-ışını dalgalarının girişim yapması esasına dayanmaktadır. Şekil 5.1’de periyodik düzlemler içeren bir kristal yapıdan yansıyan iki X-ışını görülmektedir.



Şekil 5.1. Monokromatik X-ışınlarının atomik düzlemlerden yansıması.

Yukarıdaki şekilde λ gelen ışının dalga boyu, θ gelen ışın ile yansıtıcı düzlem arasındaki açı ve d paralel düzlemler arasındaki mesafedir. Gönderilen ışınlardan birincinin üst atomik tabakadan, ikincinin ise alt atomik tabakadan yansıdığı dikkate alındığında, ikinci ışının $2d\sin\theta$ mesafesi kadar fazladan yol aldığı görülür. Eğer $2d\sin\theta$ mesafesi gelen X-ışınlarının dalga boyunun tam katlarına tekabül ederse iki ışın da aynı fazda olur.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’deki ifadeye Bragg eşitliği denir (Kittel, 1996). Bu eşitlikten yola çıkılarak numune yüzeyi belirli bir açı aralığında tarandığında, $2d\sin\theta$ mesafesinin dalga boyunun tam katlarına eşit olduğu durumlara ait açılar, numuneyi meydana getiren atomik düzlemler hakkında bilgi verir.

Bir X-ışını difraktometresi temel olarak; monokromatik X-ışını üretebilen bir kaynak, gonyometre ve dedektörden oluşur. Gonyometre yardımıyla istenen değer aralığında numune yüzeyine gönderilen ışınlar yansıdıktan sonra dedektör tarafından algılanarak bilgisayara aktarılır ve yazılım yardımıyla ışın şiddetinin 2θ değerine karşı grafiği oluşturulur. X-ışını deseninden 2θ saçılma açısı belirlenerek kristal düzlemleri arasındaki d mesafesi hesaplanır; d mesafesinin bilinmesi sonucu kristal düzleminin yönelimi ve örgü parametreleri belirlenerek yapısal bilgiler türetilir.

Bu çalışmada, üretilen ince filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için PANalytical Empyrean X-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, $1,54056 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ ışını kullanılarak, $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ sınır değerleri arasında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen X-ışını kırınımı desenleri pik listeleri ve literatürdeki daha önce yapılmış araştırmaların bulguları ile karşılaştırılarak oluşan fazlar tespit edilmiştir. Kristalin tercihli yönelimini belirlemek için yapılanma katsayısı (TC) kullanılmıştır. TC,

$$TC(h_i k_i l_i) = \frac{I(h_i k_i l_i)}{I_0(h_i k_i l_i)} \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{I(h_i k_i l_i)}{I_0(h_i k_i l_i)}} \right]^{-1} \quad (5.2)$$

eşitliği ile verilir. Burada $I_0(h_i k_i l_i)$; $(h_i k_i l_i)$ düzleminin standart şiddetini, $I(h_i k_i l_i)$ ise aynı düzlemin gözlenen şiddeti ve n ise kırınım deseni üzerindeki piklerin toplam sayısını ifade eder. Ortalama tanecik büyüklüğü (D) ve dislokasyon yoğunluğu (δ) sırasıyla Denklem 5.3 ve 5.4'te verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5.3)$$

$$\delta = 1/D^2 \quad (5.4)$$

Denklem 5.3'te; k Sherrer sabiti (0,89), λ kullanılan X-ışınının dalga boyu, β pikin yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri ve θ ise değerlendirilen pikin Bragg yansıma açısıdır. Dislokasyon yoğunluğu (δ) ise kristalin birim hacmi başına dislokasyon çizgilerinin uzunluğu olarak tanımlanır ve yüksek δ değerleri filmlerin daha düşük kristalleşme seviyelerine sahip olduğunu ortaya koyar. δ değerleri yapıdaki çizgisel kusurların miktarını gösterir (Williamson ve Smallman, 1956).

X-ışını kırınım desenlerinde gözlenen piklerin pozisyonlarındaki hafif kaymalar sıkışmış veya genişlemiş örgü düzlemlerine sahip tanelerin bulunduğunu gösterir (Joseph vd., 1999). Bu durum aşağıdaki denklem ile incelenir:

$$\langle e \rangle = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (5.5)$$

Burada $\langle e \rangle$ malzemedeki makro gerilmeleri, d deformasyon halinde düzlemler arası mesafeyi ve d_0 ise deformasyon olmadığı durumdaki düzlemler arasındaki mesafeyi göstermektedir (Cullity, 1966; Vigil vd., 2000). Kübik, tetragonal, hekzagonal, trigonal, rombik, monoklinik ve triklinik yapılar için düzlemler arası mesafe sırasıyla,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \quad (5.6)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.8)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2+k^2+l^2)\sin^2\alpha + 2(hk+kl+hl)(\cos^2\alpha - \cos\alpha)}{a^2(1-3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha)} \quad (5.9)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.10)$$

$$\frac{1}{d^2} = \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos\beta}{ac} \right) \csc^2\beta \quad (5.11)$$

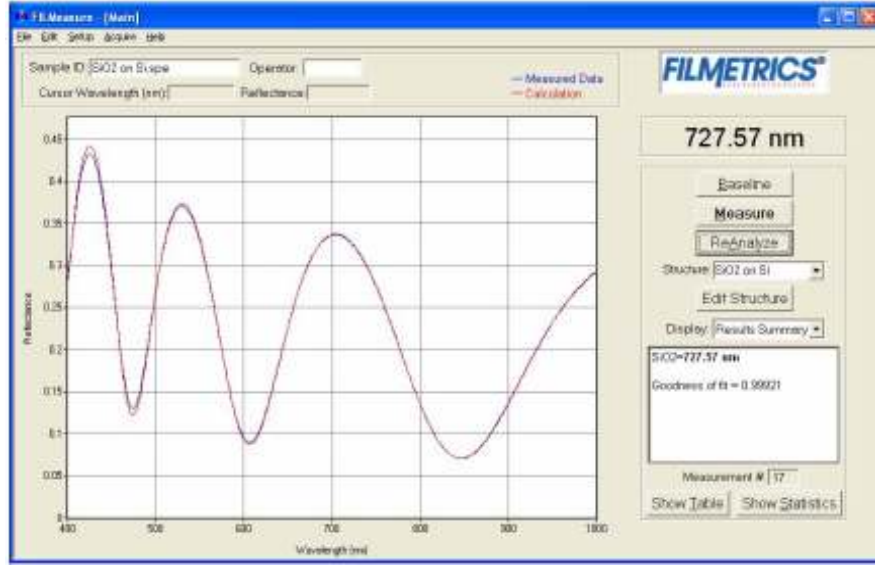
$$\frac{1}{d^2} = \frac{\frac{h^2}{a^2} \sin^2\alpha + \frac{k^2}{b^2} \sin^2\beta + \frac{l^2}{c^2} \sin^2\gamma}{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma} \quad (5.12)$$

bağıntıları ile hesaplanır (Brandon, 2013).

5.2.2. Spektroskopik yansıma ölçümü

Spektroskopik yansıma ölçümü, ince filmlerin kalınlıklarını ve optik sabitlerini (kırılma indisi n ve sönüm katsayısı k) belirlemek için yaygın olarak kullanılan, numuneye zarar vermeyen, temassız bir optik ölçüm tekniğidir. Bu tekniğin temeli, incelenecek numune üzerine gönderilen ışık demetinin numuneden yansımadan önceki ve sonraki şiddetinin ölçümüne dayanmaktadır. Bir numuneden yansıyan ışık demetinin şiddetinin gelen ışık demetinin şiddetine oranına “mutlak yansıma” denir. Ancak, gelen ışık demetinin şiddetini bir numuneden yansımadan önce direkt olarak ölçmek oldukça zordur. Bu yüzden bağıl yansıma ölçümlerine başvurulur. Burada incelenen numuneden yansıyan ışık demetinin şiddeti bir referans numunesinden yansıyan aynı ışık demetinin şiddetine bölünür. İncelenen numuneden yansıyan ışık demetinin şiddetinin referans numunesinden yansıyan ışık demetinin şiddetine oranına “bağıl yansıma” denir. Buna göre, referans numunesinin mutlak yansıması bilindiği müddetçe incelenmek istenen bir numunenin mutlak yansıması, bağıl yansımasından hesaplanabilir.

Tipik bir spektroskopik yansıma ölçümü analizi, üzerinde film biriktirilmemiş alttaşın referans alınarak ölçülmesi ile başlar. Bunu numunenin aynı koşullarda ölçülmesi takip eder. Bu aşamada, yansıma spektrumları bir spektrometrede kaydedilir. Yansıyan ışık fiber optik kablolar aracılığıyla spektrometreye iletilir. Farklı ara yüzlerden yansıyan ışık tutarlı bir biçimde üst üste biner ve girişimsel etkiler oluşur. Sonuç olarak, yansıyan ışığın şiddeti dalga boyuna göre değişiklik gösterir ve bu değişiklik film kalınlığına ve filmin optik sabitlerine bağlıdır. Deneysel olarak elde edilen yansıma spektrumu, bir optik sabitler (n ve k) veri tabanından türetilen teorik bir yansıma spektrumuyla yazılım vasıtasıyla karşılaştırılır ve eğriler arasındaki en iyi uyum yakalanana kadar kalınlık ve optik sabitler optimize edilir. Yazılım sonuç olarak, film kalınlığı ve optik sabitlerin değerleri ile birlikte teorik eğri uyum iyiliği (GOF, goodness of fit) değerini verir. İncelenen numunenin doğasına bağlı olarak deneysel ve teorik yansıma eğrileri arasındaki en iyi uyumu yakalamak için morötesi, görünür veya yakın kızılötesi dalga boylarında ölçümler gerekebilir. Film kalınlığı ve optik sabitler ölçüm ile model arasındaki bir karşılaştırmadan elde edildiği için bunun dolaylı bir teknik olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2. FILMeasure yazılımının ana ekranı. Mavi eğri ölçülen yansımaya eğrisini, kırmızı eğri ise teorik eğriyi temsil etmektedir (Filmetrics F20 kullanım kılavuzu, 2005).

Bu çalışmada üretilen ince filmlerin kalınlıkları ile birlikte kırılma indislerinin ve sönüm katsayılarının 400-1000 nm dalgaboyu aralığındaki değerleri, dielektrik ve yarıiletken ince filmlerin kalınlık ve optik sabitlerini belirlemeye imkân sağlayan Filmetrics F20 ince film analiz cihazı ile elde edilmiştir. Bunun için filmlere ait optik yansımaya spektrumları 400-1000 nm dalgaboyu aralığında kaydedilmiş, yansımaya analizleri FILMeasure yazılımı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2).

5.2.3. UV/VIS/NIR spektroskopi ve yasak enerji aralığının belirlenmesi

Yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralığının belirlenmesinde kullanılan en kestirme yöntem optik soğurma spektrumunun incelenmesidir. Bu metot ile yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralığı belirlenirken, $h\nu$ film üzerine düşürülen fotonun enerjisi olmak üzere, lineer soğurma katsayısı α ve yasak enerji aralığı E_g arasındaki,

$$\alpha h\nu \approx (h\nu - E_g)^n \quad (5.13)$$

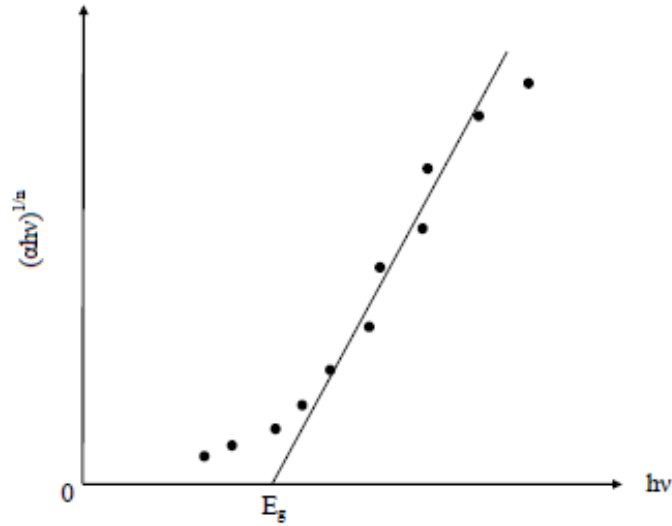
bağıntısı kullanılır. Şekil 5.3'teki gibi $(\alpha h\nu)^{1/n}$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı grafiği çizilirse, bu değişime ait lineer kısmın doğrultusunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^{1/n} = 0$ noktasında kestiği enerji değeri, incelenen filmin yasak enerji aralığını gösterir. Denklem 5.13 ve Şekil 5.3'te n direkt bant geçişinde 1/2 (izinli geçiş) veya 3/2 (yasaklı geçiş) ve indirekt bant geçişinde ise 2 (izinli geçiş) veya 3 (yasak geçiş) değerlerine sahiptir. Lineer soğurma katsayısı α ,

$$\alpha = 2,303A/t \quad (5.14)$$

ve

$$h\nu = hc/\lambda \quad (5.15)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Bu bağıntılarda A absorbands, t film kalınlığı (nm), h planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), c ışığın boşluktaki hızı (3×10^8 ms⁻¹) ve λ ise yarıiletken film üzerine düşürülen fotonun dalga boyudur (nm).



Şekil 5.3. $(\alpha h\nu)^{1/n}$ 'nin $h\nu$ 'ye göre değişimi.

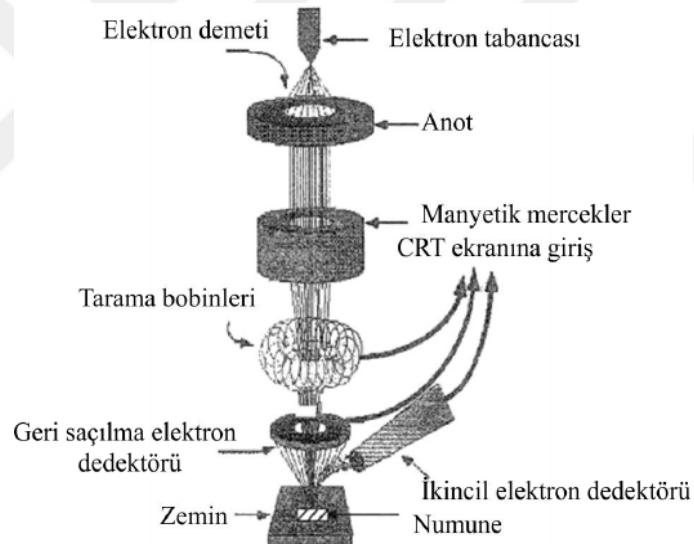
Bu çalışmada üretilen ince filmlerin optik geçirgenlik ve soğurma ölçümleri Shimadzu Solid Spec-3700 DUV UV/VIS/NIR spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir. Bu spektrofotometre ile 165-3300 nm dalga boyu aralığındaki elektromanyetik dalganın maddeler ile etkileşmesi incelenebilmektedir. Cihaz, ışık kaynağı olarak UV (morötesi) bölge için bir döteryum lamba, VIS/NIR (görünür/yakın kızılötesi) bölge için bir halojen lamba kullanmaktadır. Cihazın ışık kaynağından çıkan ışık, bir monokromatördeki kırınım ağı ile tek dalga boylu hale getirilir ve bir ayırıcı aynaya gönderilir. Bu ışık demeti ayırıcı ayna sayesinde iki kısma ayrılır ve biri ölçülecek numune üzerine, diğeri referans numunesine gönderilir. Numune ve referanstan ayrılan ışık, morötesi ve görünür bölgede bir fotoçoğaltıcı tüp (PMT) dedektörde, yakın kızılötesi bölgede ise InGaAs ve PbS detektörlerde algılanarak numunenin optik uyarıma verdiği tepki ölçülür. Bu çalışmada, analizler sırasında, referans numune tutucusuna kaplanmamış mikroskop camı konulup, cihazın kalibrasyonu yapıldıktan sonra numune tutucusuna üretilen ince film\alttaş sistemleri yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler 300-3300 nm dalga boyu aralığında, 2 nm'lik adımlarla yapılmıştır. Filmlerin elde edilen soğurma spektrumlarından faydalanılarak her bir film için lineer soğurma katsayıları hesaplanıp, $n=1/2, 3/2, 2$ ve 3 değerleri için $(\alpha h\nu)^{1/n} \sim h\nu$ değişimi grafiği çizilmiştir. Çizilen grafiklerin, bu n değerleri için eğri uyumu araştırılarak $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafikleri verilmiştir. Grafiklerin lineer kısımlarının doğrultularının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 'da kestiği noktaların enerji değerleri filmlerin yasak enerji aralıkları olarak belirlenmiştir.

5.2.4. Sıcak uç metodu

Sıcak uç tekniği bir havya ve bir voltmetre kullanılarak yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik tipini belirlemede kullanılabilecek bir yöntemdir. Bu yöntemde, iletim tipi belirlenecek yarıiletkenin yüzeyine, aralarında belirli bir mesafe olacak şekilde iki metal uç dokundurulur. Uçlardan birisi elektrikli havya yardımı ile ısıtılır, diğeri ise oda sıcaklığında bırakılır. Uçlara bir voltmetre bağlanıp pozitif uç ısıtılmışsa, voltmetrenin pozitif yönde sapması yarıiletkenin n-tipi olduğunu, negatif yönde sapması ise yarıiletkenin p-tipi olduğunu gösterir. Bu çalışmada üretilen filmlerin iletkenlik tipinin belirlenmesi için numuneler üzerinde metal kontaklar yaklaşık $0,5 \text{ mm}^2$ 'lik alanlarda, aralarında 25 mm mesafe olacak şekilde oluşturulmuştur. Soğuk uç oda sıcaklığında tutulup sıcak uç ise $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmıştır.

5.2.5. FESEM ve EDS

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), görüntü elde etmek için elektronları kullanan ve yüksek çözünürlükte görüntüler elde etmeye olanak sağlayan bir tür mikroskoptur. SEM’de incelenecek malzemelerin iletken olması gerekir. Malzemenin öz direnci yüksek ise üzerine çok ince altın kaplanır. Görüntü ise, yüksek gerilim ile hızlandırılmış elektron demetinin, yüksek vakum ortamında, numune üzerine odaklanarak yüzeyin taratılması sırasında, numune atomları tarafından kırınıma uğrayan elektron demetinin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir.



Şekil 5.4. Taramalı elektron mikroskobunun şematik diyagramı (Reimer, 1985).

Şekil 5.4’te gösterildiği gibi tipik bir SEM cihazında, elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince bir elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri, elektron demeti ile numune etkileşimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan detektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve sinyallerin kaydedildiği bir bilgisayar bulunur.

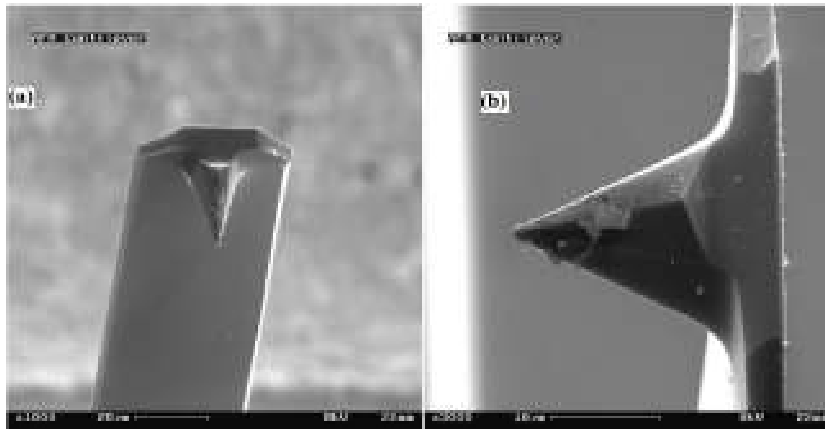
Taramalı elektron mikroskobu çeşitlerinden biri olan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopunda (FESEM), alan emisyonlu bir elektron tabancasından çıkan elektronların incelencek malzeme yüzeyi üzerine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerle yüzey görüntüsü oluşturulur. SEM’de elektron tabancasının görevi kararlı bir akım sağlamaktır. Elektron tabancalarında emisyon kaynaklarının termoiyonik yayıcı ve alan yayıcı olmak üzere iki tipi vardır. Yayıcı tipi, SEM ve FESEM arasındaki temel farkı oluşturur. Termoiyonik yayıcılar, genellikle tungstenden yapılmış bir filamanı ısıtmak için elektrik akımını kullanırlar. Isı, filamanın iş fonksiyonunu yenecek kadar olduğunda, filamandan elektronlar koparılır. Ancak termoiyonik kaynaklar katot materyalinin buharlaşması ve termal sürüklenme gibi dezavantajlara sahiptir. Bu olumsuzluklardan kaçınmanın yolu alan emisyon kullanarak elektron üretmektir. Soğuk katot alan yayıcı olarak da adlandırılan alan emisyon tabancası, bir filamanı ısıtmadan elektron üretir. Yüksek bir negatif voltaj, sivri bir metal parçasına uygulanır ve yüksek elektrik alandan dolayı bu metal parçadan elektronlar salınır. FESEM’in en önemli avantajı, iletken olmayan numunelerin yüzeylerinin iletken tabakalarla kaplanmadan görüntülerinin alınabilmesidir. Ayrıca, FESEM’deki çözünürlük SEM’e kıyasla daha yüksek olup elde edilen görüntüler daha nettir.

SEM veya FESEM ile elde edilen yüzey görüntülerinde seçilen bir bölge veya nokta için elemental analiz, enerji dağılımlı X-ışınları spektroskopisi (EDS) ile yapılmaktadır. EDS sistemi ile karakteristik X-ışınları analiz edilir. Bu şekilde hem malzemenin yüzey görüntüsü elde edilir hem de elemental bileşimi belirlenebilir. EDS cihazının çalışma prensibi şu şekildedir: Malzeme SEM’in elektron demeti ile bombardıman edilir ve malzemede bulunan elementlerin iç kabuklarında bulunan elektronlar koparılır. Kopan elektronun yerinde oluşan elektron boşluğu daha dış kabuklardaki bir elektron tarafından doldurulur ve X-ışını salınır. EDS X-ışını detektörü, enerjilerine göre salınan X-ışınlarının sayısını ölçer. Böylece dedekte edilen X-ışınlarının bağlı sayılarına göre bir enerji spektrumu elde edilir ve malzemede var olan elementlerin kalitatif ve kantitatif analizleri yapılır. Elde edilen spektrumda numune içindeki elementlerin yüzdeleri, elementlerin piklerinin altındaki alanlarla orantılıdır.

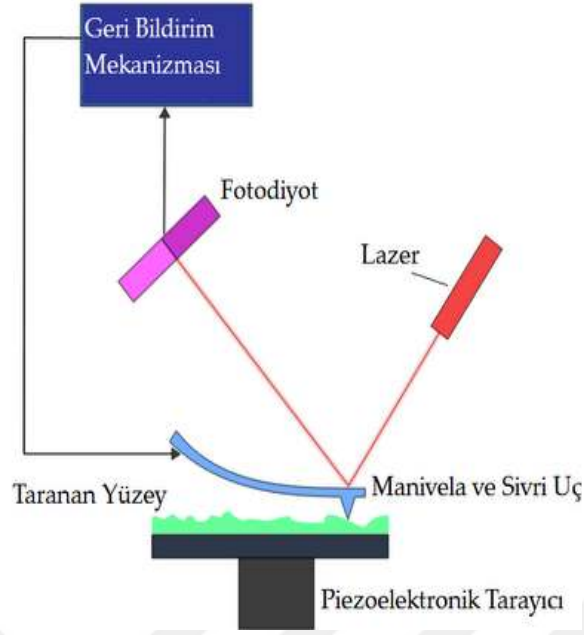
Bu çalışmada üretilen ince filmlerin yüzey özellikleri Carl Zeiss SUPRA 40VP FESEM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Numunelerin EDS bölge analizleri sonucunda atomca ve ağırlıkça element oranlarının belirlenmesi ve EDS spektrumlarının elde edilmesi için FESEM cihazına bağlı olan EDS sistemi kullanılmıştır.

5.2.6. Atomik kuvvet mikroskobu analizi

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) numunelerin yüzey özelliklerinin yüksek çözünürlükle incelenmesine olanak sağlayan bir taramalı uç mikroskobudur. Tipik bir AFM, 3 boyutlu bir yüzey görüntüsü üzerinde inceleme yapmaya olanak sağlar ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerini sayısal olarak verebilir. Üstelik herhangi bir numune hazırlama işlemi gerektirmez ve ortam koşullarında rahatlıkla kullanılabilir. AFM'nin çalışma prensibi oldukça basittir. Şekil 5.5 ve 5.6'da görüldüğü üzere 100-200 μm uzunluğundaki bir manivelanın serbest ucuna yerleştirilmiş keskin bir uç ile numune yüzeyi taranır. Bu esnada uç ile yüzey arasındaki atomlar arası kuvvetler manivelayı saptırır. Bu sapma bir sensör yardımıyla ölçülerek taranan alanın fiziksel biçimi hakkında bilgi edinilir. Genelde sapma miktarının ölçümü yayın yüzeyinden yansıyan lazer ışınının bir dizi foto diyot ile algılanması sonucu gerçekleştirilir. Elde edilen görüntülerdeki beyaz bölgeler üst üste yığılmış tane şeklindeki oluşumları, siyah bölgeler ise tane boşluklarını gösterir. Renklerin çoğunlukla aynı olması ise film yüzeyinin homojen bir yükseklik dağılımına sahip olduğunun bir göstergesidir.

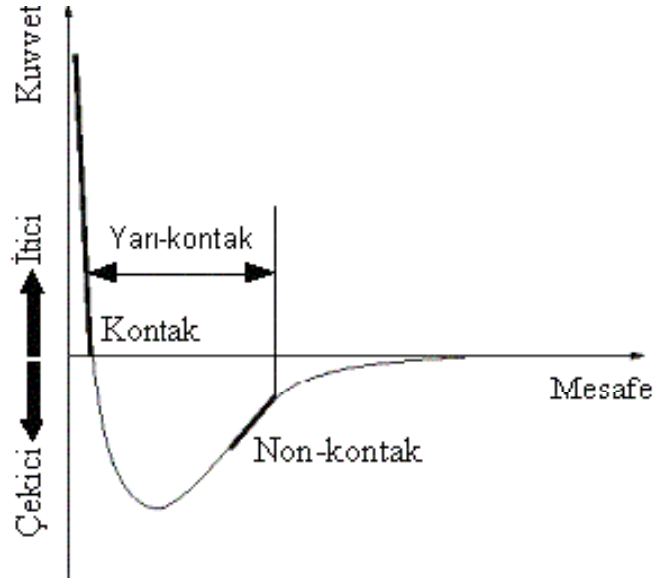


Şekil 5.5. Atomik kuvvet mikroskobunun manivelasının ve sivri ucunun (a) 1000 kez (b) 3000 kez büyütülmüş elektron mikroskobu görüntüleri.



Şekil 5.6. Atomik kuvvet mikroskopunda temel görüntü alma mekanizması (<http://nanoturkiye.blogspot.com/2008/04/nano-101-atomik-kuvvet-mikroskopu.html>).

AFM analizleri üç farklı modda gerçekleştirilir. Bunlar; kontak, non-kontak ve yarı-kontak modlardır. İşlemin modu uç ile numune arasındaki mesafeye göre belirlenir.



Şekil 5.7. Uç-numune arasındaki kuvvetin mesafe ile değişimi (Oura vd., 2003).

Şekil 5.7’de verilen uç ve numune yüzeyi arasındaki kuvvetlerin mesafeye bağlı değişimi incelendiğinde, ucun numuneye yaklaştırıldığı durumda uç, eğrinin sağ tarafında görülebileceği gibi yüzey tarafından zayıfça çekilir. Uç-numune arası mesafenin azalması ile birlikte bu çekim, uç ve numune yüzeylerindeki atomların elektron bulutlarının birbirlerini elektrostatik olarak itmeye başladığı mesafeye kadar artar. Mesafenin biraz daha azalmasıyla itici kuvvet artar ve kimyasal bağ uzunluğu mertebesinde bir mesafede net kuvvet sıfır olur. Bu noktada uç ile yüzey arasında fiziksel temas başlar. Bundan daha yakın mesafelerde ise eğrinin sol tarafında görülebileceği gibi itici kuvvet baskındır. Kontak modda uç ve numune arasındaki mesafe birkaç Å mertebesinde. Bu nedenle uç, numune yüzeyi ile hafif fiziksel temas halindedir ve itici kuvvetlere maruz kalır. Bu modda yüzey topografisi, sabit yükseklikten tarama sonucunda cantilever sapmasından elde edilebilir ya da cantilever sapması sabit tutularak yüzey yükseklik değişiminden elde edilebilir. Non-kontak modda ise uç ile numune arasındaki mesafe yaklaşık olarak 50-150 Å mertebesinde. Bu durumda uç, zayıf çekici kuvvetlere maruz kalır. Bu çekici kuvvet kontak moddaki kuvvetlerden daha zayıf olup kuvvet mesafe eğrisinden de görüleceği üzere yüzey yükseklik değişimine daha az duyarlıdır. Bu nedenle bu modda yüzey topografisini elde etmek kontak moddakinden farklı bir mekanizma kullanmayı gerektirir. Bunun için, cantilever, rezonans frekansına yakın bir frekansta titreştirilir. Uç numuneye yaklaştığında frekans veya genlikteki değişimler elde edilir. Bu noktada, non-kontak ölçümler dış titreşimlerden, uç ve cantilever kalitesinden etkilenebilir. Yarı-kontak mod, non-kontak moddan biraz farklı olup bu modda cantilever kendi rezonans frekansında titreştirilir. Uç her bir salınımda yüzey ile anlık fiziksel temas gerçekleştirir. Numuneye yaklaşma durumunda salınımın şiddetinde meydana gelen değişim değerlendirilir. Ancak bu modda kuvvetler non-kontak moddakinden daha güçlü olduğu için ölçümler ucun kalitesine ya da dış titreşimlere karşı daha duyarsızdır (Oura vd., 2003).

Pürüzlülük, yüzey ya da ara yüzeydeki bütün atomları kapsayan bir tür kusurdur. Pürüzlülüğün belirlenmesi için kullanılan parametrelerden biri olan ve en yaygın şekilde kullanılan ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü (RMS ya da R_q), yüzeydeki yüksekliklerin standart sapmasını temsil eder. RMS aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Raposo, 2007):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (5.16)$$

Denklem 5.8’de N veri alınan nokta sayısı, $\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i$ ortalama yükseklik (AH) değeridir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ise diğer bir tür pürüzlülük değeri olup; medyan düzleminden sapmaların aritmetik ortalamasını ifade eder ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Raposo, 2007):

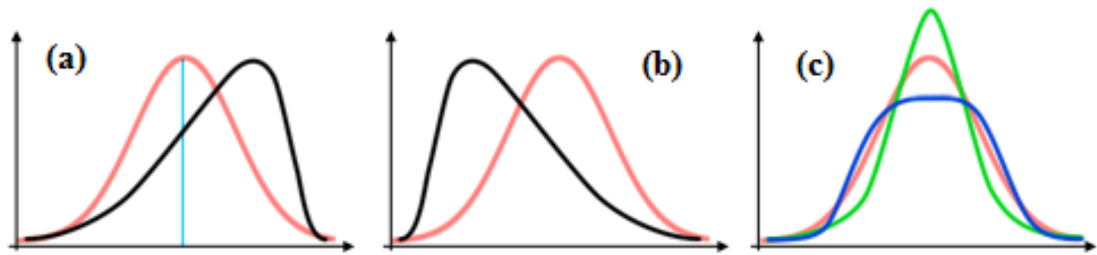
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}| \quad (5.17)$$

Üretilen filmlerin yüzey özelliklerini daha detaylı olarak inceleyebilmek için, skewness ve kurtosis momentlerine bakılabilir. Skewness ve kurtosis momentleri sırasıyla asimetriyi ve yüzey düzlüğünü ölçen parametrelerdir. Skewness ve kurtosis momentleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır (Raposo, 2007):

$$Ssk = \frac{1}{NR_q^3} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^3 \quad (5.18)$$

$$Skr = \frac{1}{NR_q^4} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^4 \quad (5.19)$$

Yükseklik dağılımı simetrik olduğunda, skewness değeri sıfır olur. Eğer yükseklik dağılımı asimetric ve yüzey çukurlardan çok tepelere sahip ise, skewness değeri pozitiftir. Öte yandan, eğer yüzey daha düz ve çukurlar baskın ise, skewness değeri negatiftir. Gaussian yüzeyi simetrik bir yükseklik değeri dağılımı sergiler. Burada tepe ve çukurların eşit olduğu düşünülür. Gaussian yükseklik dağılımına sahip bir yüzeyin kurtosis değeri sıfırdır, ancak, kurtosis negatif ise, yüzey düzdür. Kurtosis değeri pozitif olduğunda ise, yüzey çukurlardan çok tepelere sahiptir (Şekil 5.8).

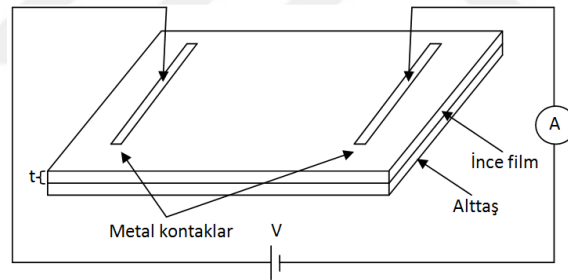


Şekil 5.8. Negatif skewness (a) pozitif skewness (b) negatif (mavi eğri) ve pozitif (yeşil eğri) kurtosis (c). Pembe eğriler normal dağılımı gösterir (<http://www.scratchapixel.com>).

Bu çalışmada üretilen ince filmlerin iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) atomik kuvvet mikroskobu görüntülerini elde etmek amacıyla Ambios Q-scope atomik kuvvet mikroskobu kullanılmıştır. Ölçümler hava ortamında, oda sıcaklığında, non-kontak moda, 4 Hz tarama hızında $4\text{ }\mu\text{m} \times 4\text{ }\mu\text{m}$ ve $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ 'lik alanlar taranarak gerçekleştirilmiştir. Scan Atomic SPM Software-2009 yazılımı ile 40 hat boyunca yapılan değerlendirmeler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü (R_q , RMS), ortalama yükseklik (AH), çarpıklık (Skewness, Ssk) ve basıklık (Kurtosis, Skr) değerleri belirlenmiştir.

5.2.7. İki uç tekniği

Yarıiletken bir malzemeye metal kontak yapılarak gerilim kaynağı ve ampermetre ile malzemenin elektriksel iletkenliğinin ve öz direncinin belirlenmesine dayalı yöntem “iki uç tekniği” olarak adlandırılır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. İki uç tekniğinin şematik gösterimi.

İki uç tekniğinde metal kontaklar arasına uygulanan gerilime karşılık akım değerleri ölçülür ve

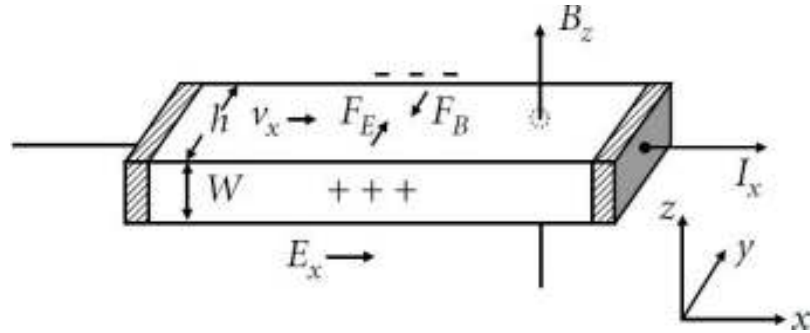
$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta I} \frac{(t \times l)}{L} \quad (5.20)$$

denklemini kullanılarak malzemenin elektriksel iletkenliği ve öz direnci belirlenir. Burada ΔV ve ΔI sırası ile voltaj ve akım değişimlerini, t film kalınlığını, L metal kontaklar arası mesafeyi ve l kontak uzunluğunu temsil etmektedir (Schroder, 2006).

Bu çalışmada üretilen ince filmlerin akım-voltaj değerleri her bir numune için iki uç tekniği ile Keithley 2400 akım gerilim kaynağı kullanılarak oda sıcaklığında -2 V'tan 2 V'a kadar uygulanan voltaj 0,05 V basamaklar ile arttırılarak elde edilmiştir. Metal kontaklar altın uçlarla sağlanmıştır. Kontak uzunluğu $\sim 0,5$ mm olup kontaklar arası mesafe 1 cm'dir. Elde edilen ölçüm sonuçlarından faydalanarak her bir materyal için akım-voltaj (I-V) grafikleri çizilmiştir. Filmlerin özdirenç ve iletkenliklerinin hesaplanmasında bu grafiklerden yararlanılmıştır.

5.2.8. Hall etkisi ölçümü

Yarıiletkenlerin serbest taşıyıcı yoğunluğunu, özdirencini, iletkenliğini, mobilitelerini ve iletim tipini belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın yöntem Hall etkisi ölçümüdür. Hall etkisi, akım taşıyan bir iletken üzerine etkiyen kuvvetler araştırılırken 1879 yılında E.H. Hall tarafından keşfedilmiştir. Buna göre, üzerinden akım geçen bir yarıiletken numuneye akıma dik bir doğrultuda manyetik alan uygulandığında numunenin karşılıklı yüzeyleri arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bu olay "Hall etkisi" olarak bilinir.



Şekil 5.10. Hall etkisi olayının şematik diyagramı (Orton, 2004).

Şekil 5.10'daki gibi dikdörtgenler prizması şeklinde p-tipi bir yarıiletken numuneden E_x elektrik alanının etkisinde x doğrultusunda yoğunluğu J_x olan bir akım geçtiği ve bu akıma dik doğrultuda düzgün bir manyetik alan uygulandığı göz önünde bulundurulduğunda, taşıyıcı hızı v_x ise manyetik alandan dolayı pozitif yük taşıyıcılarının üzerine etkiyen Lorentz kuvveti;

$$F_B = -eB_Z v_x \quad (5.21)$$

şeklindedir. Bu kuvvet taşıyıcıların $-y$ yönünde hareket etmelerine neden olur. Burada e birim yüktür. Hollerin bu hareketinden dolayı yarıiletkenin kenarları arasında bir E_y elektrik alanı oluşur ve bir süre sonra Lorentz kuvveti ile dengelenir. Denge durumunda $J_y = 0$ olur ve

$$eB_Z v_x = eE_y \quad (5.22)$$

yazılabilir. Yarıiletkenin iki yan yüzü arasında oluşan bu voltaj, “Hall voltajı (V_H)” adını alır ve büyüklüğü;

$$V_H = hE_y \quad (5.23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada h malzemenin genişliğidir. Denklem 5.21’den Hall alanı E_y ’nin, manyetik alan B_Z ile orantılı olduğu, dolayısıyla J_x akım yoğunluğu ile de orantılı olduğu görülebilir ve

$$E_y = R_H J_x B_Z \quad (5.24)$$

biçiminde ifade edilir. R_H orantı sabitine Hall sabiti denir. Denklem (5.24), Denklem (5.22) ve $J_x = ep_0 v_x$ eşitliği ile birlikte kullanılırsa;

$$R_H = \frac{E_y}{B_Z J_x} = \frac{v_x}{J_x} = \frac{1}{ep_0} \quad (5.25)$$

yazılabilir. Bu bağıntı ile R_H ’nin ölçülmesi ile p_0 hol yoğunluğu hesaplanabilir. Benzer şekilde n-tipi bir yarıiletken göz önünde bulundurulursa;

$$R_H = -\frac{1}{en_0} \quad (5.26)$$

yazılabilir. Burada n_0 elektron yoğunluğudur. Bu nedenle R_H Hall katsayısının işareti yarıiletkendeki iletkenliğin ne tür taşıyıcı tarafından yapıldığını yani yarıiletkenin tipini belirler. Göz önünde bulundurulanan yarıiletkenin kalınlığı W ve genişliği h ise;

$$R_H = \frac{E_y}{B_z I_x} = \left(\frac{V_H}{h} \right) \left(\frac{B_z I_x}{W h} \right) = \frac{V_H W}{B_z I_x} = \frac{(V_D - V_C) W}{B_z I_x} \quad (5.27)$$

yazılabilir. Taşıyıcı mobilitesini bulabilmek için öncelikle yarıiletkenin iletkenliğinin dolayısı ile yüzey ve hacim öz direnç değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. O halde,

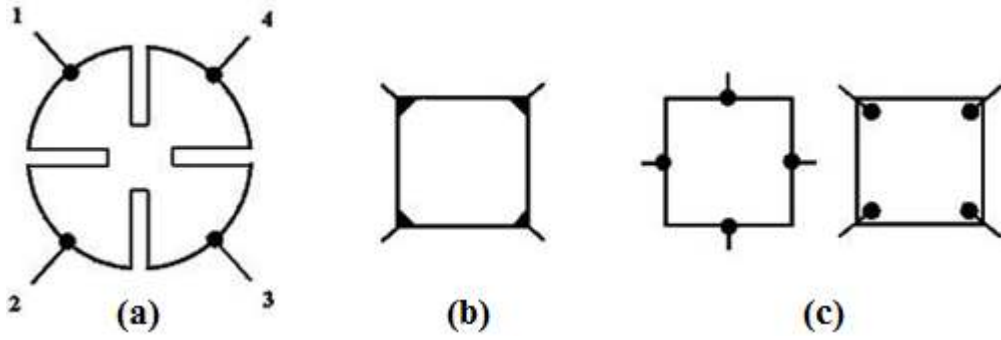
$$\sigma = \frac{J_x}{E_y} = \frac{\left(\frac{J_x}{Wh} \right)}{[(V_A - V_B)/l]} = \frac{I_x}{(V_A - V_B) \frac{l}{Wh}} \quad (5.28)$$

şeklinde yazılabilir. Taşıyıcı mobilitesi de;

$$\mu_p = \frac{\sigma_p}{e p_0} = \sigma_p R_H \quad (5.29)$$

şeklinde ifade edilebilir (Orton, 2004).

Bir yarıiletken ince filmde mobilite μ ve yüzey taşıyıcı yoğunluğu n_s 'yi belirlemek için direnç ve Hall ölçümlerinin birlikte yapılabilmesi gerekmektedir. Düzgün örneklerin direncini belirlemede Van Der Pauw tekniği oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Van der Pauw, 1958). Hall olayında Hall voltajı ve direnç ölçümü için Şekil 5.11'de gösterildiği gibi numunelere Van der Pauw geometrisinde omik kontaklar alınması gerekir. Omik kontaklara dört iletken tel, örnek üzerindeki dört omik kontakta Şekil 5.11'daki gibi saat yönünün tersinde 1, 2, 3, 4 ile gösterildiği gibi bağlanır. Termomanyetik etkileri minimize etmek için dört iletken telin hepsi aynı gruptan seçilmelidir. Benzer şekilde dört omik kontak da aynı malzemeden oluşmalıdır.



Şekil 5.11. Hall ölçümünde tercih edilen (a), kabul edilebilir (b) ve önerilmeyen (c) örnek geometrileri.

Direnç ölçümünün amacı R_S yüzey direncini belirlemektir. Van der Pauw R_A ve R_B gibi iki karakteristik direnç olduğunu açıklamıştır ve bu dirençlere karşılık gelen uçlar Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de gösterilmiştir. R_A ve R_B yüzey direnci R_S arasındaki bağıntılı olup Van der Pauw denklemi ile

$$e^{\frac{\pi R_A}{R_S}} + e^{\frac{\pi R_B}{R_S}} = 1 \quad (5.30)$$

şeklinde ifade edilir (Van der Pauw, 1958). Buradan R_S sayısal olarak elde edilebilir. Simetrik numuneler için $R_A = R_B = R$ olup yüzey direnci R_S ,

$$R_S = \frac{\pi R}{\ln 2} \quad (5.31)$$

olarak bulunur. Dirençler için daha kesin bir değer elde etmek için numunenin dört kenarından dört Van der Pauw direnci ölçülür ve R , bu dört direnç değerinin ortalamasıdır. Van der Pauw tekniğinde Hall ölçümünün amacı V_H Hall gerilimini ölçerek n_S yüzey taşıyıcı yoğunluğunu belirlemektir. Hall gerilim ölçümü, sabit bir akım ve örnek düzlemine dik bir manyetik alan uygulanmasıyla birlikte bir dizi gerilim ölçümünden ibarettir. V_H ’ı ölçmek için bir I akımı Şekil 5.11’de görülen karşılıklı kontak çifti 1 ve 3’ten geçmeye zorlanır ve bunun karşısındaki geri kalan kontak çiftleri 2 ve 4’ten ise V_H (V_{24}) Hall gerilimi ölçülür. I , B , q bilinenleriyle ve V_H Hall geriliminin belirlenmesiyle yüzey taşıyıcı yoğunluğu $n_S = IB/q|V_H|$ eşitliği kullanılarak belirlenebilir. Burada R_A ve R_B değerleri;

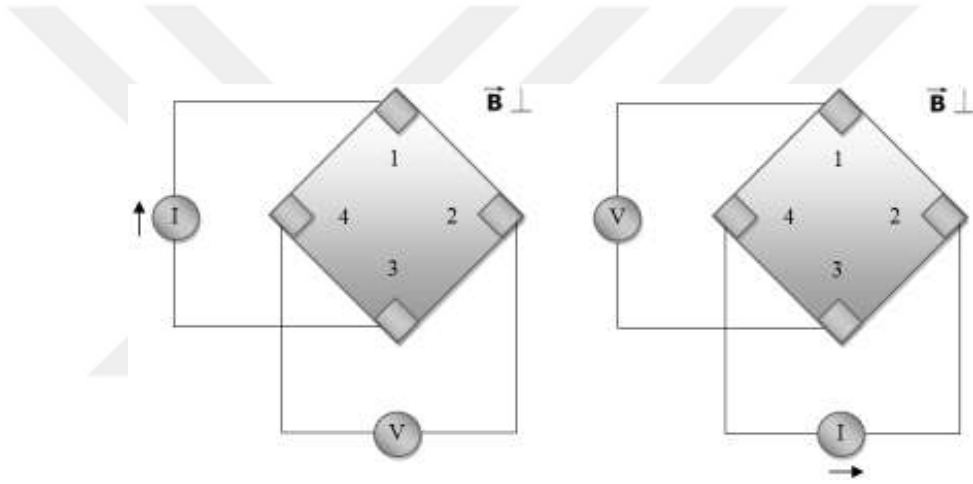
$$R_A = \left(\frac{R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}}{4} \right) \quad (5.32)$$

$$R_B = \left(\frac{R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32}}{4} \right) \quad (5.33)$$

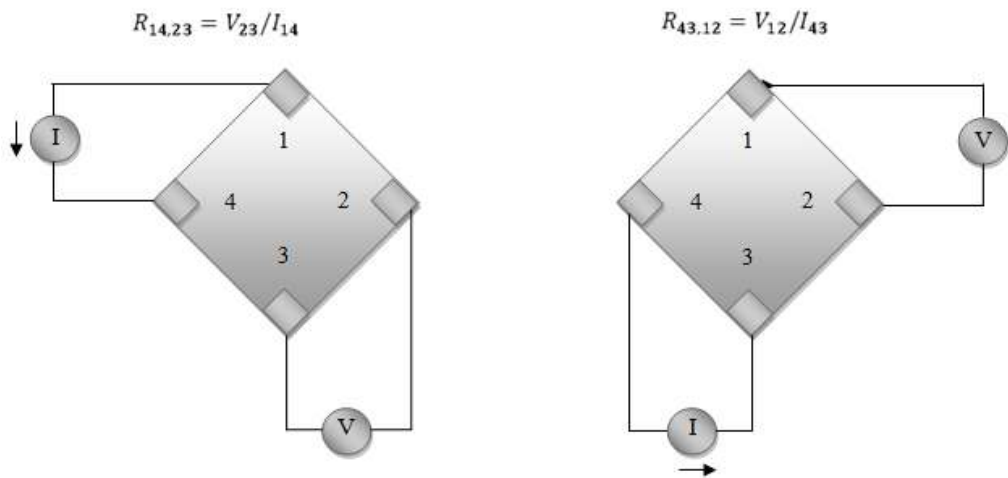
şeklinde hesaplanır. Yarıiletken ince filmin kalınlığı t olmak üzere hacimsel öz direnç;

$$\rho = R_{st} \quad (5.34)$$

şeklinde hesaplanır.



Şekil 5.12. Van der Pauw tekniği ile Hall voltajı ölçümü.



Şekil 5.13. Van der Pauw tekniği ile direnç ölçümü.

Eğer gerilimlerin toplamı pozitif ise;

$$p_s = \frac{8 \times 10^{-8} IB}{[q(V_C + V_D + V_E + V_F)]} \quad (5.35)$$

olur ve gerilimler toplamı negatif ise;

$$n_s = \left| \frac{8 \times 10^{-8} IB}{[q(V_C + V_D + V_E + V_F)]} \right| \quad (5.36)$$

şeklindedir. Burada B manyetik alanı Gauss ve I akımı Amper olarak seçilebilir. Eğer numunenin yüzey taşıyıcı yoğunluğu ve kalınlığı biliniyorsa hacimsel taşıyıcı yoğunluğu bulunabilir;

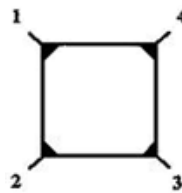
$$n_0 = \frac{n_s}{d} \quad (5.37)$$

ve

$$p_0 = \frac{p_s}{d} \quad (5.38)$$

Hall mobilitesi yüzey taşıyıcı yoğunluğu n_s (veya p_s) ve yüzey direnci R_S 'den $\mu = 1/qn_s R_S$ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

Bu çalışmada üretilen ince filmlerin oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonları ve mobiliteleri Hall etkisi ölçüm sistemi kullanılarak 2,4 tesla manyetik alan altında Van Der Pauw tekniği ile Şekil 5.14'te gösterildiği gibi kontaklar yapılarak belirlenmiştir.

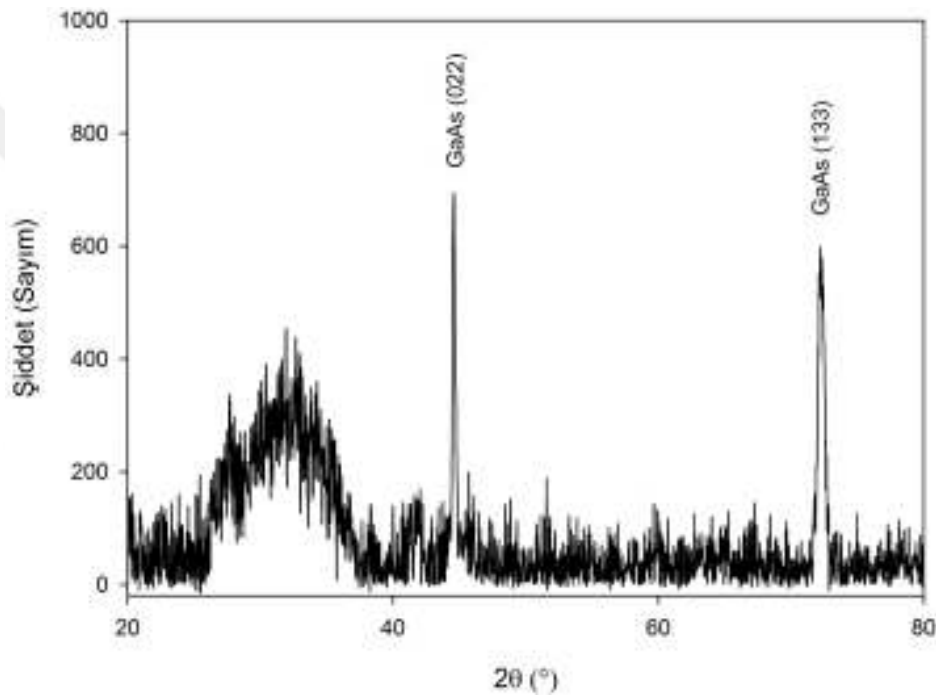


Şekil 5.14. Hall etkisi ölçümünde kullanılan geometri.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. X-ışını Kırınımı Çalışmaları

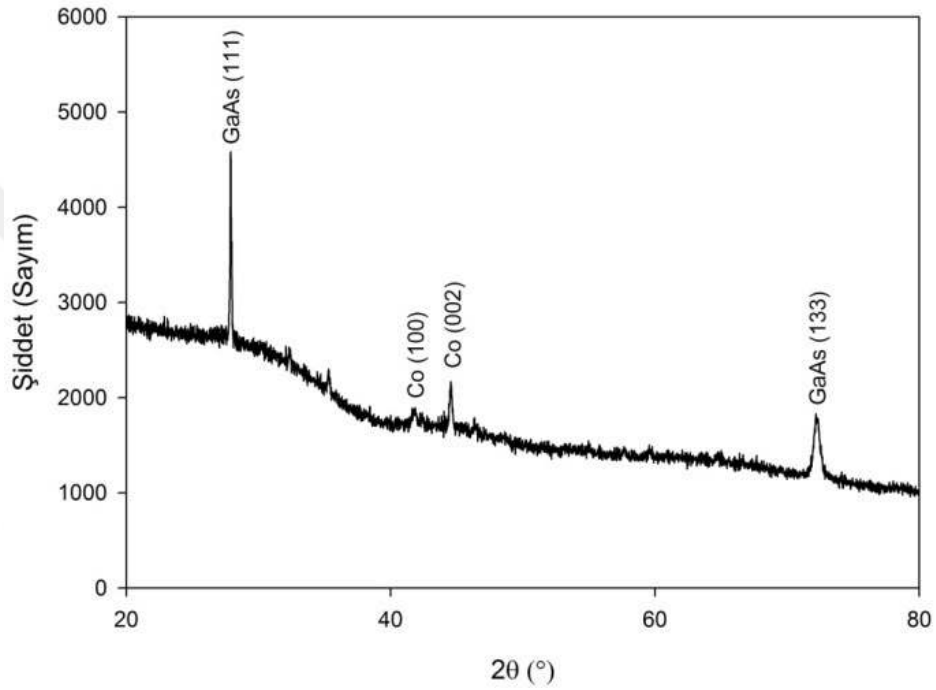
Üretilen filmlerin X-ışını kırınımı çalışmalarından elde edilen XRD desenleri Şekil 6.1 ile Şekil 6.7 arasında gösterilmektedir. XRD desenlerinde görülen piklerin üzerinde ilgili düzlemlerin miller indisleri verilmektedir.



Şekil 6.1. Üretilen GaAs ince filmin XRD deseni (Pat vd., 2015a).

Şekil 6.1’de üretilen GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekilde, $45,32^\circ$ ve $72,85^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik GaAs yapısına ait (022) ve (133) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir (JCPDS Kart No: 32-0389). Şekil 6.1’deki (022) GaAs piki için TC değeri 0,23, (133) GaAs piki için ise TC değeri 1,77 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, bu filmin (133) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü bir düzleme ait TC değeri birden büyük ise o düzlemin tercihli yönelime sahip olduğu söylenir. Yapılanma katsayısı daha büyük olan (133) GaAs pikinin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri

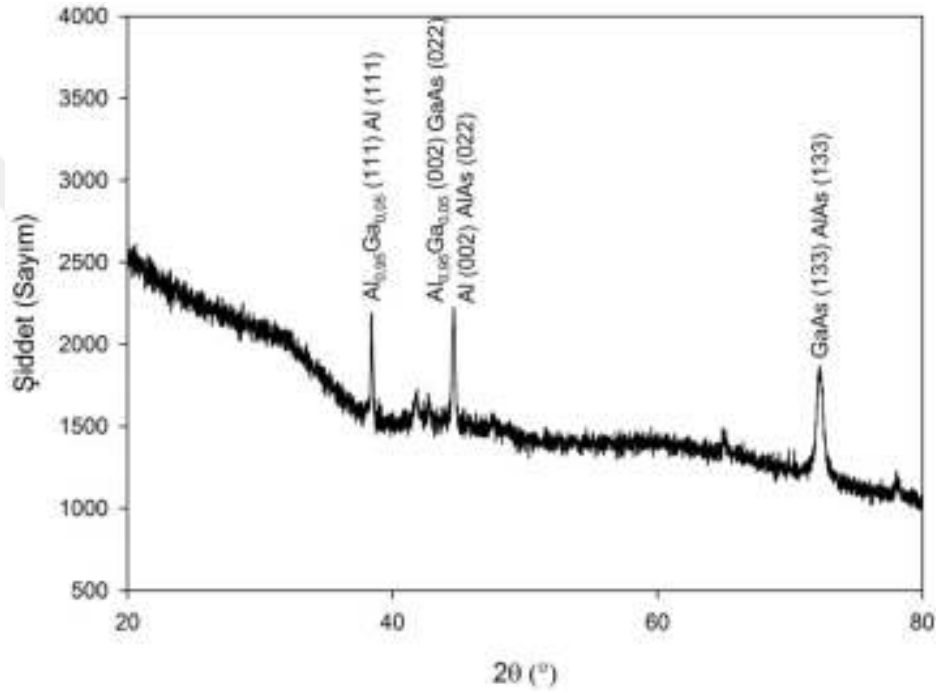
kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 34 nm olup dislokasyon yoğunluğu $8,65 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 'dir. Makro gerilme değeri ise $-8,51 \times 10^{-7}$ 'dir. Piklerin pozisyonlarındaki kaymaları gösteren makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.2. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.2’de üretilen Co katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, $27,32^\circ$ ve $72,92^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik GaAs yapısına ait (111) ve (133) yansıma düzlemlerine, $41,58^\circ$ ve $44,60^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin ise, hekzagonal Co yapısına ait (100) ve (002) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir (JCPDS Kart No: 32-0389; 01-1278). Bu durumda filmin polikristal yapıda olduğu söylenebilir. Şekil 6.2’deki (111) GaAs piki için TC değeri 1,02, (100) Co piki için TC değeri 0,22, (002) Co piki için TC değeri 0,40, (133) GaAs piki için ise TC değeri 2,35 olarak hesaplanmıştır. Burada yapılanma katsayısı değeri birden büyük iki düzlem mevcuttur. Bu nedenle incelenen Co katkılı GaAs ince film (111) ve (133)

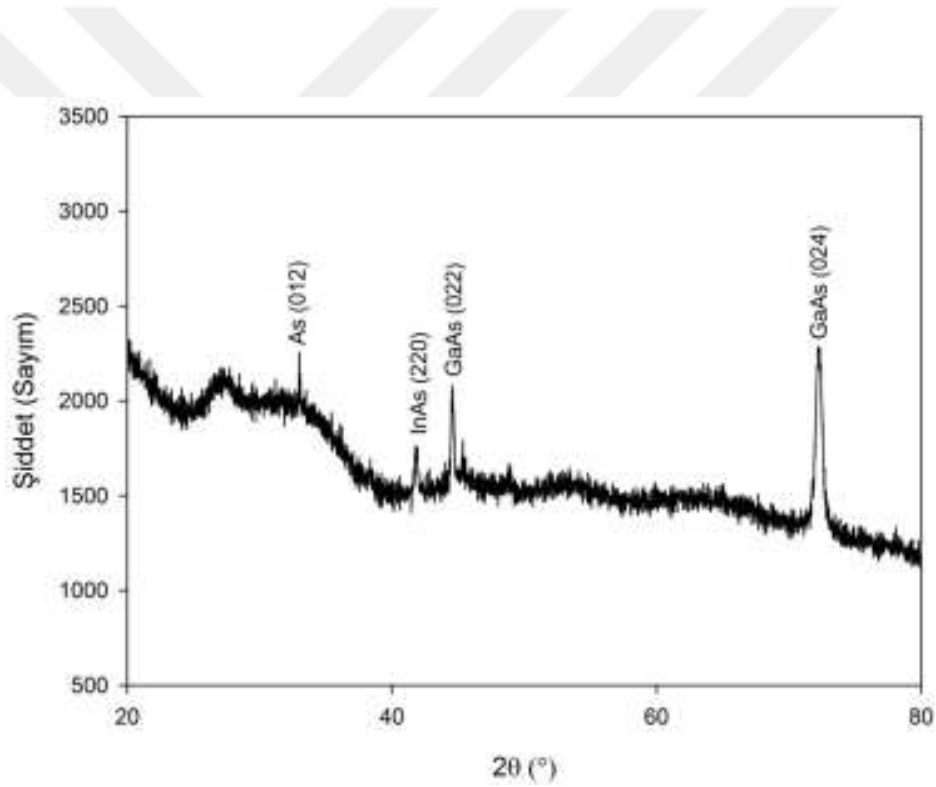
düzlemleri boyunca, rastgele yönelim göstermektedir. Yapılanma katsayısı en büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 29 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,18 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 'dir. Makro gerilme değeri ise $-8,51 \times 10^{-7}$ 'dir. Makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.3. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Özen vd., 2015f).

Şekil 6.3'te üretilen Al katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, $38,29^\circ$ ve $44,50^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik Al yapısına ait (111) ve (002) yansıma düzlemlerine, $38,41^\circ$ ve $44,65^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik $\text{Al}_{0,95}\text{Ga}_{0,05}$ yapısına ait (111) ve (002) yansıma düzlemlerine, $45,27^\circ$ ve $72,76^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik AlAs yapısına ait (002) ve (133) yansıma düzlemlerine, $45,28^\circ$ ve $72,77^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin ise, kübik GaAs yapısına ait (002) ve (133) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir (Referans Kodu: 98-015-0692; 98-010-7815; 98-065-6315; 98-061-0543). Bu durumda filmin polikristal yapıda olduğu söylenebilir. Şekil 6.3'teki (111) Al piki için

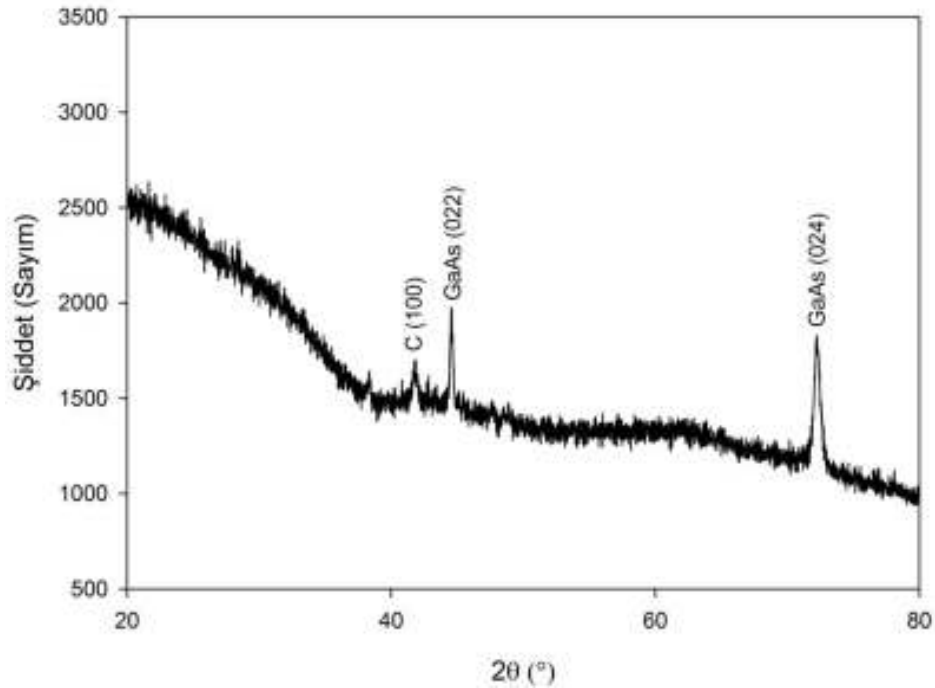
TC değeri 0,35, (002) Al piki için TC değeri 0,83, (111) $\text{Al}_{0,95}\text{Ga}_{0,05}$ piki için TC değeri 0,35, (002) $\text{Al}_{0,95}\text{Ga}_{0,05}$ piki için TC değeri 0,83, (022) AlAs piki için TC değeri 0,69, (133) AlAs piki için TC değeri 2,26, (022) GaAs piki için TC değeri 0,57, (133) GaAs piki için TC değeri 2,26 ise olarak hesaplanmıştır. Buradan bu filmin (133) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılanma katsayısı en büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 30 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,11 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dir. Makro gerilme değeri ise $-8,51 \times 10^{-7}$ dir. Makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.4. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Pat vd., 2015c).

Şekil 6.4'te üretilen In katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, $32,38^\circ$ 2θ değerinde gözlemlenen pikin, hekzagonal As yapısına ait (012) yansıma düzlemine, $42,02^\circ$ 2θ değerinde gözlemlenen pikin, çinko sülfür InAs yapısına ait (220) yansıma düzlemine, $45,32^\circ$ ve $75,06^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin ise kübik GaAs yapısına ait (022) ve (024) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir.

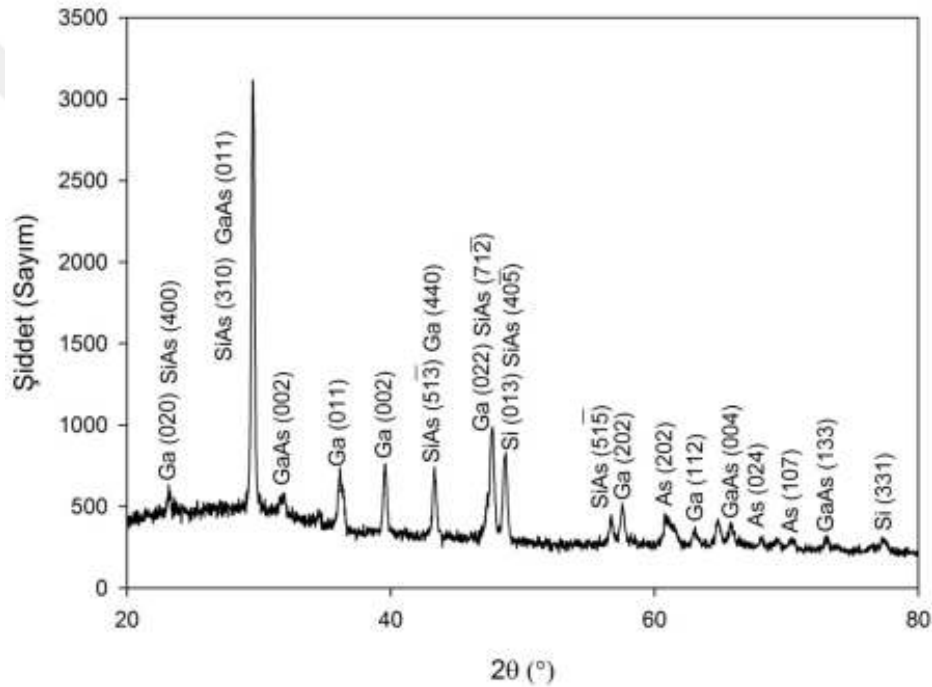
(JCPDS Kart No: 01-0044; 89-3314; 32-0389). Bu durumda filmin polikristal yapıda olduğu söylenebilir. Şekil 6.4'teki (012) As piki için TC değeri 0,01, (220) InAs piki için TC değeri 0,02, (022) GaAs piki için TC değeri 0,03, (024) GaAs piki için ise TC değeri 2,99 olarak hesaplanmıştır. Buradan bu filmin (024) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılanma katsayısı en büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 30 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,11 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 'dir. Makro gerilme değeri ise $-1,26 \times 10^{-6}$ 'dır. Makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.5. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Pat vd., 2016a).

Şekil 6.5'te üretilen C katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, $41,73^\circ$ 2θ değerinde gözlemlenen pikin, hekzagonal C yapısına ait (100) yansıma düzlemine, $45,32^\circ$ ve $75,06^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin ise, kübik GaAs yapısına ait (022) ve (133) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir (JCPDS Kart No: 75-1621; 32-0389). Bu durumda filmin polikristal yapıda olduğu

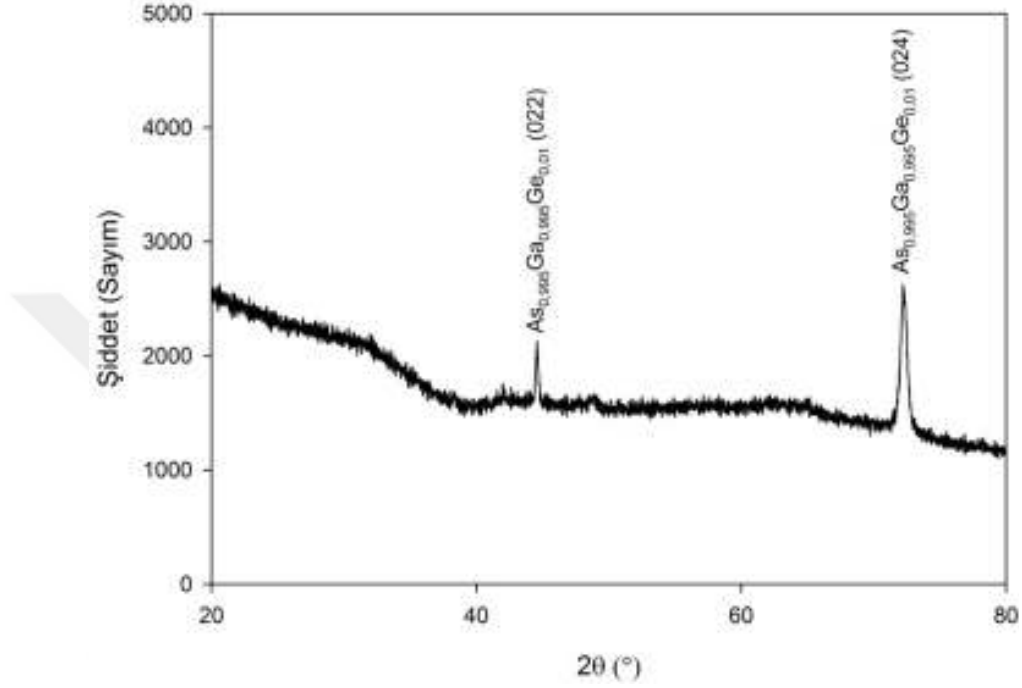
söylenbilir. Şekil 6.5'teki (100) C piki için TC değeri 0,06, (022) GaAs piki için TC değeri 0,03, (024) GaAs piki için ise TC değeri 1,00 olarak hesaplanmıştır. Buradan bu filmin (024) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılanma katsayısı en büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 30 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,11 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 'dir. Makro gerilme değeri ise $-1,26 \times 10^{-6}$ 'dır. Makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.



Şekil 6.6. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Şenay vd., 2015c).

Şekil 6.6'da üretilen Si katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, üretilen Si katkılı GaAs ince filmin polikristal yapıda olduğu görülmektedir. Elde edilen XRD deseni JCPDS pik listeleri ile karşılaştırıldığında, gözlemlenen piklerin Ga, Si, SiAs ve GaAs element ve bileşiklerinin fazlarına ait oldukları tespit edilmiştir (JCPDS Kart No: 65-2493; 27-1402; 01-0363; 32-0389). Şekil 6.6'da görülen piklerden TC değeri birden büyük olan tek pik (002) GaAs pikidir. Buradan bu filmin (002) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılanma

katsayısı en büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 25 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,60 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dir. Makro gerilme değeri ise sıfırdır.

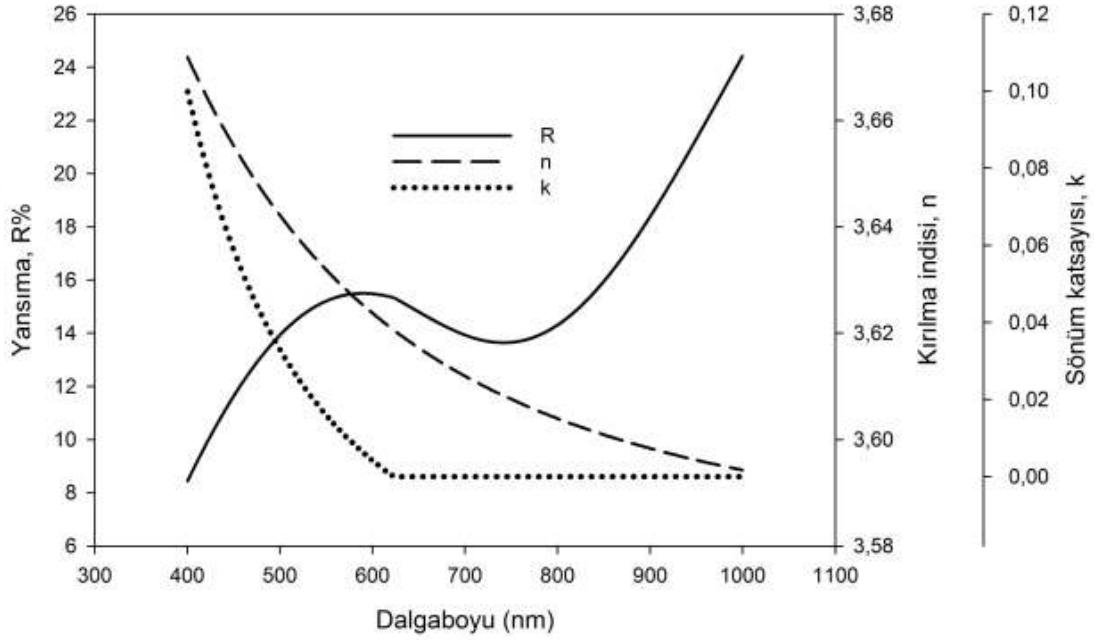


Şekil 6.7. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin XRD deseni (Pat vd., 2016b).

Şekil 6.7’de üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin XRD deseni verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde, $45,34^\circ$ ve $75,09^\circ$ 2θ değerlerinde gözlemlenen piklerin, kübik $\text{As}_{0,995}\text{Ga}_{0,995}\text{Ge}_{0,01}$ yapısına ait (022) ve (024) yansıma düzlemlerine karşılık geldiği görülmektedir (Referans Kodu: 98-004-3952). Bu durumda filmin polikristal yapıda olduğu söylenebilir. Şekil 6.7’teki (022) $\text{As}_{0,995}\text{Ga}_{0,995}\text{Ge}_{0,01}$ piki için TC değeri 0,01, (024) $\text{As}_{0,995}\text{Ga}_{0,995}\text{Ge}_{0,01}$ piki için ise TC değeri 1,99 olarak hesaplanmıştır. Buradan bu filmin (024) yönünde bir tercihli yönelim gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılanma katsayısı daha büyük pikin pozisyonu ve yarı maksimumdaki genişliğinin radyan cinsinden değeri kullanılarak Scherrer bağıntısı ile hesaplanan kristal boyutu 30 nm olup dislokasyon yoğunluğu $1,11 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dir. Makro gerilme değeri ise $-5,31 \times 10^{-4}$ tür. Makro gerilme değerinin bu denli küçük olması kristalde deformasyonun az olduğunun bir göstergesidir. Bu değer negatif olması sıkışmış örgü düzlemlerinin varlığını göstermektedir.

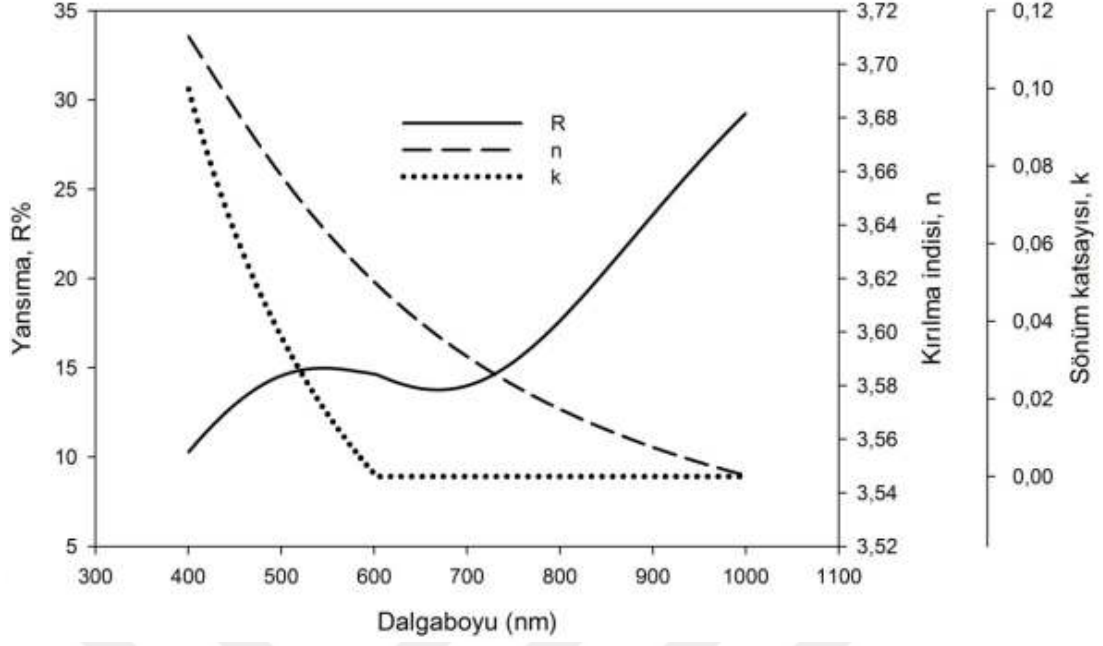
6.2. Spektroskopik Yansımaya Ölçümü Çalışmaları

Üretilen filmlerin spektroskopik yansımaya ölçümü çalışmalarından elde edilen yansımaya spektrumları, kırılma indisi ve sönüm katsayısı dağılımları ile birlikte Şekil 6.8 ile Şekil 6.14 arasında verilmektedir.



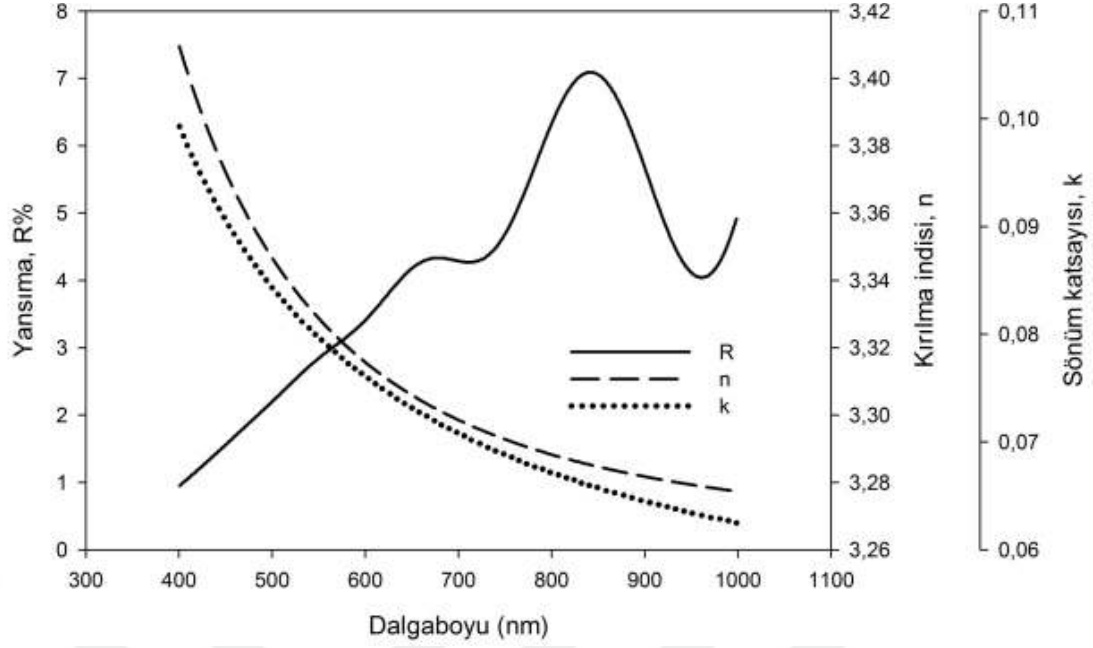
Şekil 6.8. Üretilen GaAs ince filmin yansımaya, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları.

Şekil 6.8'de üretilen GaAs ince filmin yansımaya, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen GaAs ince filmin gözlemlenen dalga boyu aralığında %8 ile %24 arasında değişen bir optik yansımaya sahip olduğu ve kırılma indisinin değerinin artan dalga boyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Sönüm katsayısı ise 400 nm'den 620 nm'ye kadar artan dalga boyu ile birlikte azalmakta, 620 nm'den daha büyük dalga boylarında ise sıfır değerini almaktadır. Yansımaya spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~1000 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalga boyunda 3,62 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen kırılma indisi değeri literatürde ile uyum göstermektedir (Skauli vd., 2003). Eğri uyum iyiliği (GOF) değeri 0,99 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (1000 nm) işlem süresine (120 s) bölünerek 8,33 nm/s olarak hesaplanmıştır.



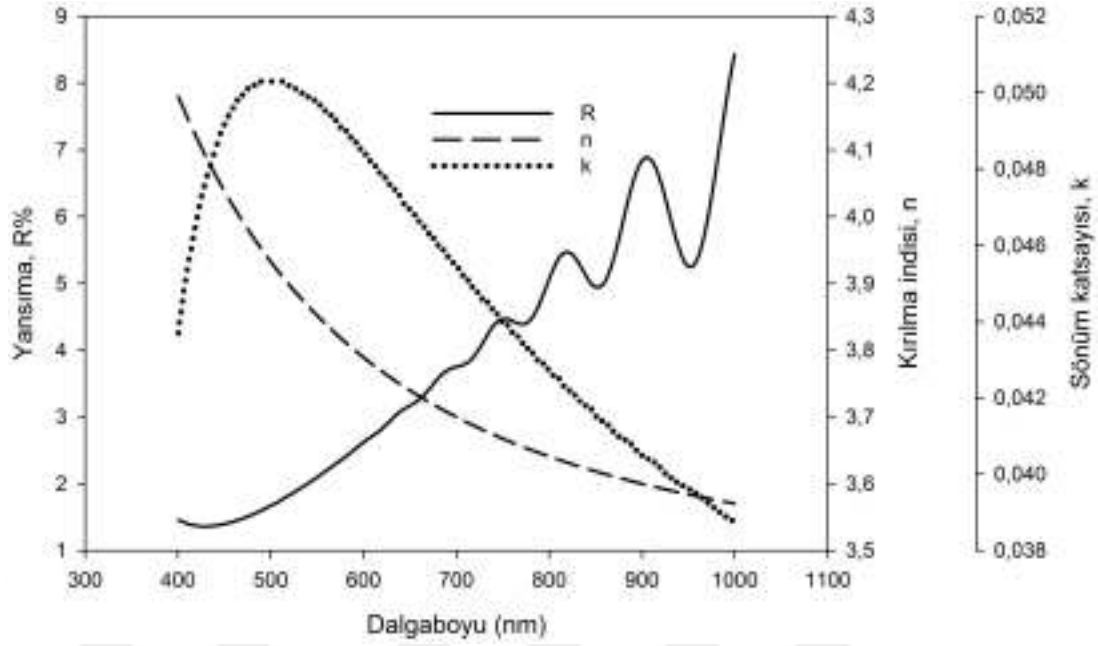
Şekil 6.9. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin yansıtma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.9'da üretilen Co katkılı GaAs ince filmin yansıtma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Co katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgaboyu aralığında %10 ile %30 arasında değişen bir optik yansımaya sahip olduğu ve kırılma indisinin değerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Sönüm katsayısı ise 400 nm'den 600 nm'ye kadar artan dalgaboyu ile birlikte azalmakta, 600 nm'den daha büyük dalgaboylarında ise sıfır değerini almaktadır. Yansıtma spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~80 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgaboyunda 3,60 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,99 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (80 nm) işlem süresine (60 s) bölünerek 1,33 nm/s olarak hesaplanmıştır.



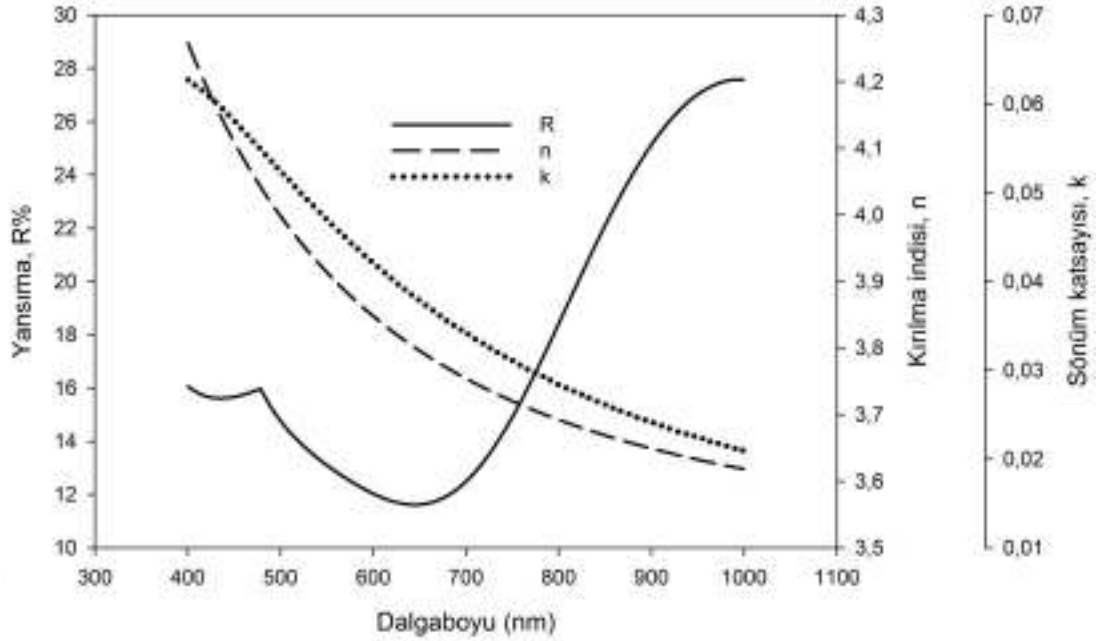
Şekil 6.10. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları (Özen vd., 2015f).

Şekil 6.10'da üretilen Al katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Al katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgaboyu aralığında %1 ile %7 arasında değişen bir optik yansımaya sahip olduğu ve kırılma indisi ile sönüm katsayısı değerlerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Yansımanın en yüksek ($R=7\%$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 845 nm'dir. Elde edilen yansım spektrumu literatür ile uyumludur (Wosko vd., 2011). Kırılma indisi ve sönüm katsayısı dağılımları da literatür ile uyumludur (Rinzan vd., 2005; Rutkowska vd., 2011; Wosko vd., 2011). Yansım spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~ 1800 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgaboyunda 3,30 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,98 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (1800 nm) işlem süresine (190 s) bölünerek 9,47 nm/s olarak hesaplanmıştır.



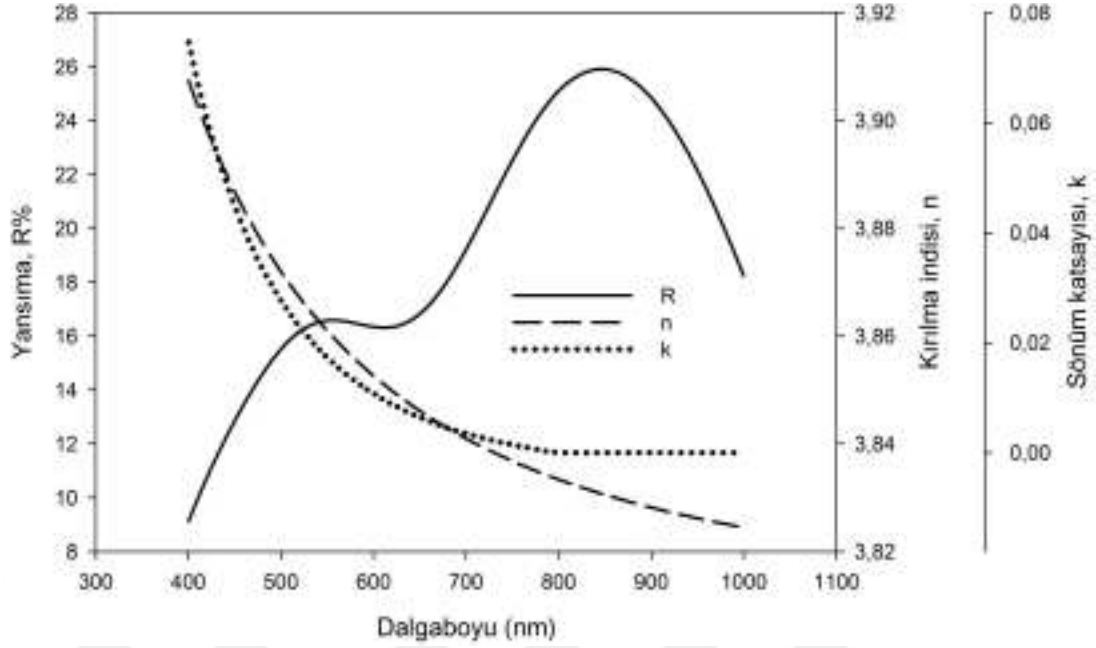
Şekil 6.11. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin yansırma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları.

Şekil 6.11’de üretilen In katkılı GaAs ince filmin yansırma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen In katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgalıboyu aralığında %1 ile %8 arasında değışen bir optik yansırmaıya sahip olduğu ve kırılma indisinin değerinin artan dalgalıboyu ile birlikte azaldığı görölmektedir. Sönüm katsayısı ise soğurma katsayısının artması dolayısıyla 400 nm’den 500 nm’ye kadar artan dalgalıboyu ile birlikte artmakta, 500 nm’den daha büyük dalgalıboylarında ise artan dalgalıboyu ile birlikte azalmaktadır. Yansırma spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~1000 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgalıboyunda 3,76 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,99 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (1000 nm) işleml süresine (75 s) bölünerek 13,33 nm/s olarak hesaplanmıştır.



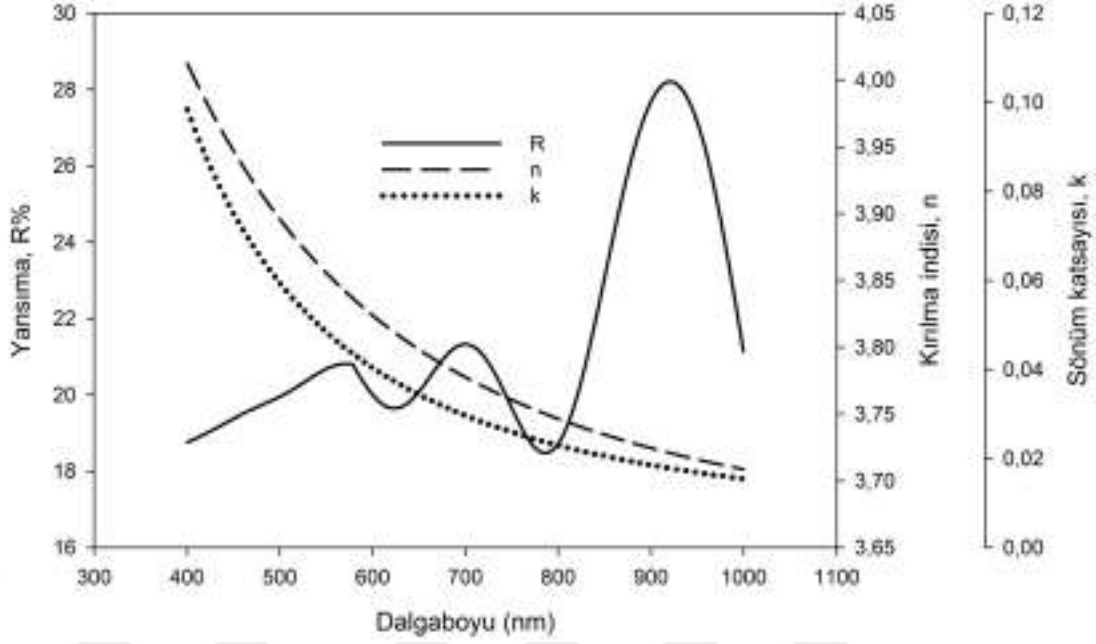
Şekil 6.12. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları.

Şekil 6.12’de üretilen C katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen C katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgaboyu aralığında %12 ile %28 arasında değişen bir optik yansımayla sahip olduğu ve kırılma indisi ile sönüm katsayısı değerlerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Yansımanın en düşük ($R=\%12$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 650 nm’dir. Yansım spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~160 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgaboyunda 3,81 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,97 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (160 nm) işlem süresine (40 s) bölünerek 4,00 nm/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.13. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları.

Şekil 6.13'te üretilen Si katkılı GaAs ince filmin yansım, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Si katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgaboyu aralığında %9 ile %26 arasında değişen bir optik yansımaya sahip olduğu ve kırılma indisi ile sönüm katsayısı değerlerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Yansımanın en yüksek ($R=\%26$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 850 nm'dir. Yansım spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~ 160 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgaboyunda 3,85 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,99 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (160 nm) işlem süresine (50 s) bölünerek 3,20 nm/s olarak hesaplanmıştır.

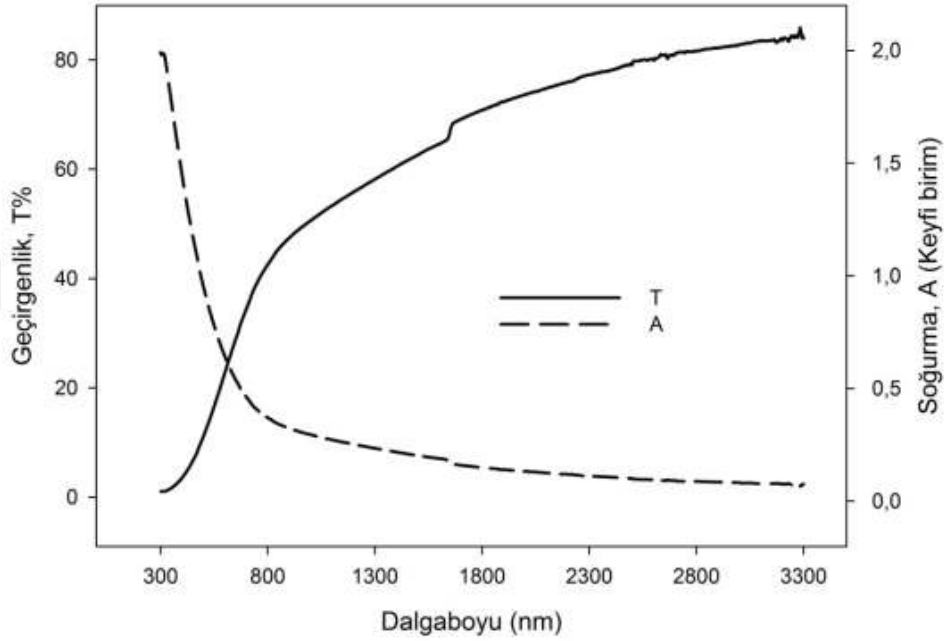


Şekil 6.14. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin yansıtma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları.

Şekil 6.14'te üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin yansıtma, kırılma indisi ve sönüm katsayısı spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin gözlemlenen dalgaboyu aralığında %18 ile %28 arasında değişen bir optik yansımaya sahip olduğu ve kırılma indisi ile sönüm katsayısı değerlerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı görülmektedir. Yansımanın en yüksek ($R=\%28$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 920 nm'dir. Yansıtma spektrumunda gözlenen girişim saçakları ince film üzerine gelen ışığın ince film-cam ve ince film-hava ara yüzeylerinden geçerken uğradığı çoklu yansımalar sonucunda oluşup film yüzeyinin oldukça düz ve pürüzsüz olduğunu göstermektedir. Yansıtma spektrumunun spektral analizinden film kalınlığının ~340 nm, kırılma indisinin ise 632,8 nm dalgaboyunda 3,80 olduğu belirlenmiştir. GOF değeri 0,99 olup filmin birikme hızı, film kalınlığı (340 nm) işlem süresine (180 s) bölünerek 1,88 nm/s olarak hesaplanmıştır.

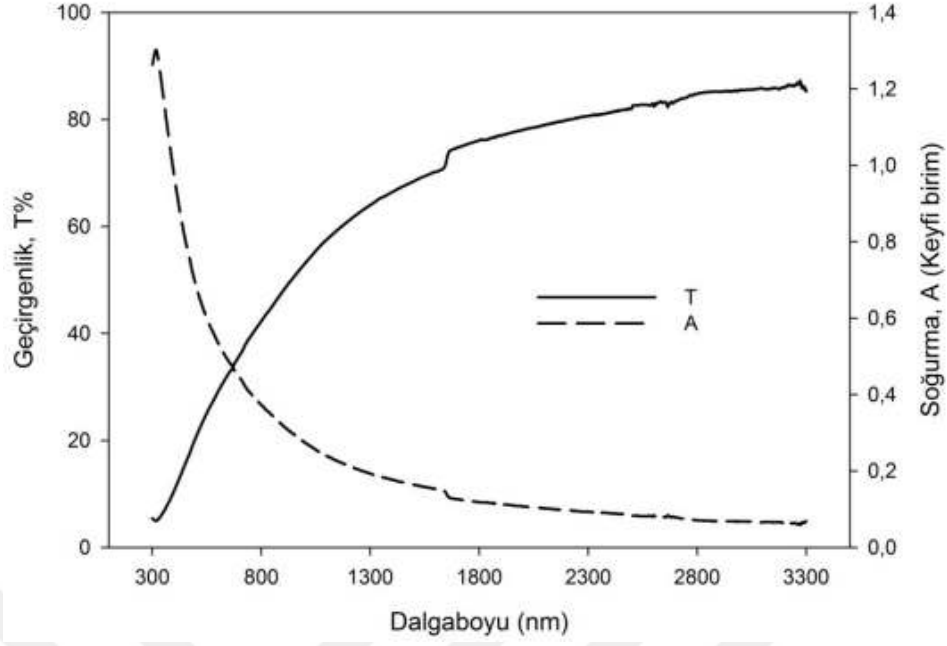
6.3. UV/VIS/NIR Spektroskopi Çalışmaları ve Bant Aralığının Belirlenmesi

Üretilen filmlerin UV/VIS/NIR spektroskopi çalışmalarından elde edilen optik geçirgenlik ve soğurma spektrumları Şekil 6.15 ile Şekil 6.21 arasında verilmektedir.



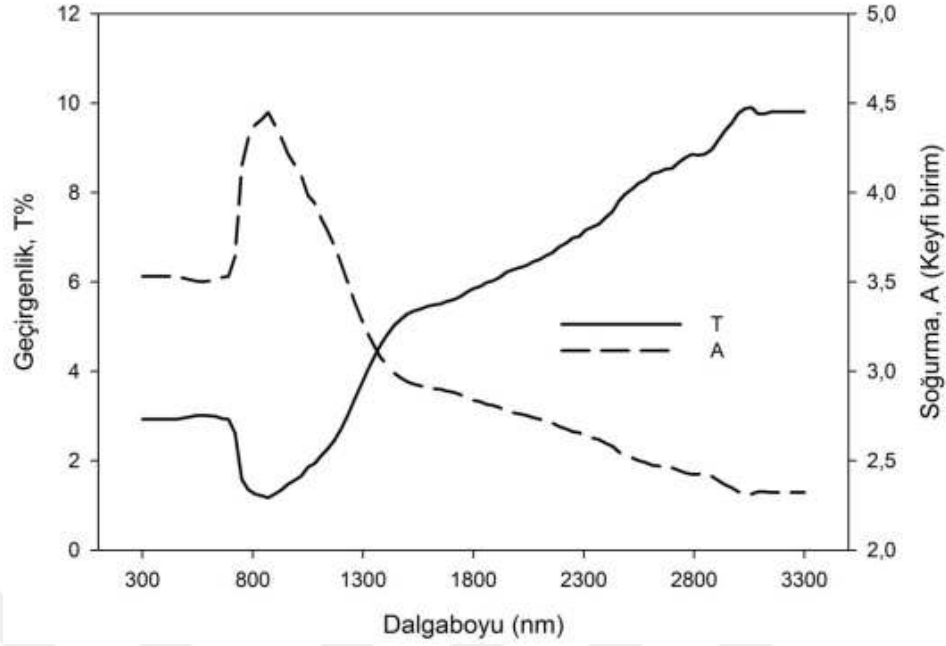
Şekil 6.15. Üretilen GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.

Şekil 6.15'te üretilen GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen GaAs ince filmin geçirgenliğinin 300 nm'den 800 nm'ye kadar hızlı bir biçimde artış göstererek %1'den %43'e ulaştığı, 800 nm'den sonra da artan dalga boyu ile birlikte yavaşça artmaya devam ettiği ve 3300 nm'de T=%84 değerini aldığı görülmektedir. Soğurma ise geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek 300 nm dalga boyundan başlayarak 800 nm dalga boyuna kadar hızlı bir azalma göstermiş 800 nm'den sonra da artan dalga boyu ile birlikte yavaşça azalmaya devam etmiştir. Bu gözlemler literatür ile uyumludur (Rasha vd., 2008).



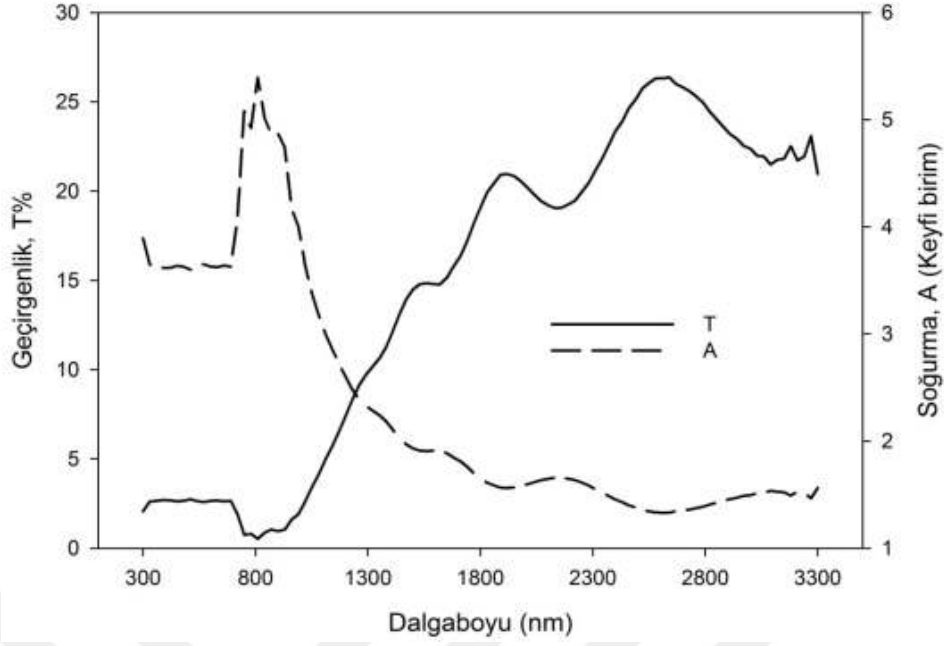
Şekil 6.16. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.16’da üretilen Co katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Co katkılı GaAs ince filmin geçirgenliğinin 300 nm’den 1650 nm’ye kadar hızlı bir biçimde artış göstererek %5’ten %75’e ulaştığı, 1650 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça artmaya devam ettiği ve 3300 nm’de $T=85$ değerini aldığı görülmektedir. Soğurma ise geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek 300 nm dalgaboyundan başlayarak 1650 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir azalma göstermiş 1650 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça azalmaya devam etmiştir.



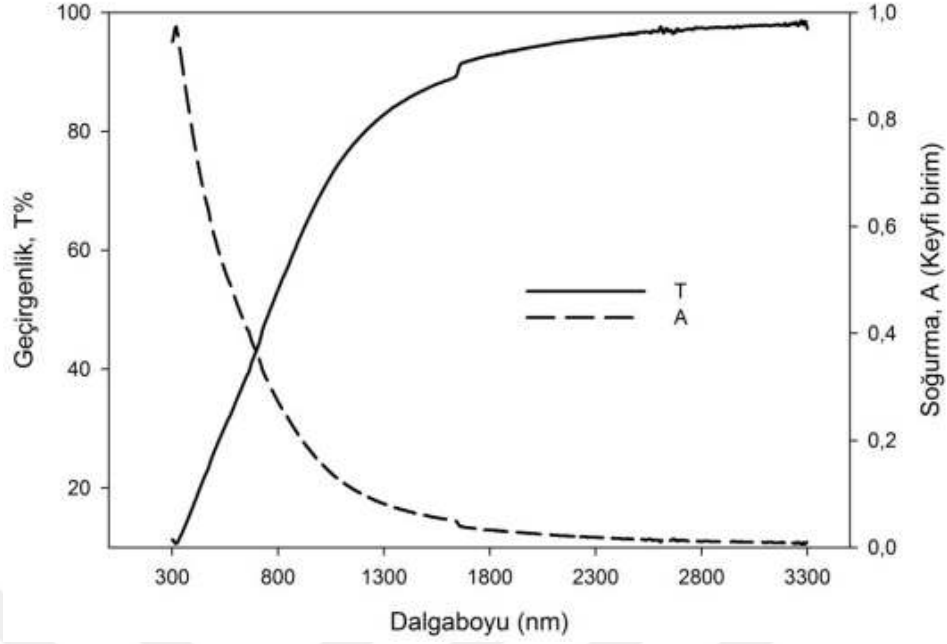
Şekil 6.17. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.

Şekil 6.17’de üretilen Al katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Al katkılı GaAs ince filmin 300-700 nm dalgaboyu aralığında %3 civarında sabit bir geçirgenliğe sahip olduğu, geçirgenliğin 700 nm’den 850 nm’ye kadar keskin bir azalış göstererek %1’e düştüğü, 850 nm’den 1500 nm’ye kadar ise artış göstererek %5’e yükseldiği 1500 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte artmaya devam ettiği ve 3300 nm’de $T = 10\%$ değerini aldığı görülmektedir. Soğurma ise 300-700 nm dalgaboyu aralığında sabit olup 850 nm’den sonra geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek geçirgenlik azaldığında artmış, arttığında ise azalmıştır.



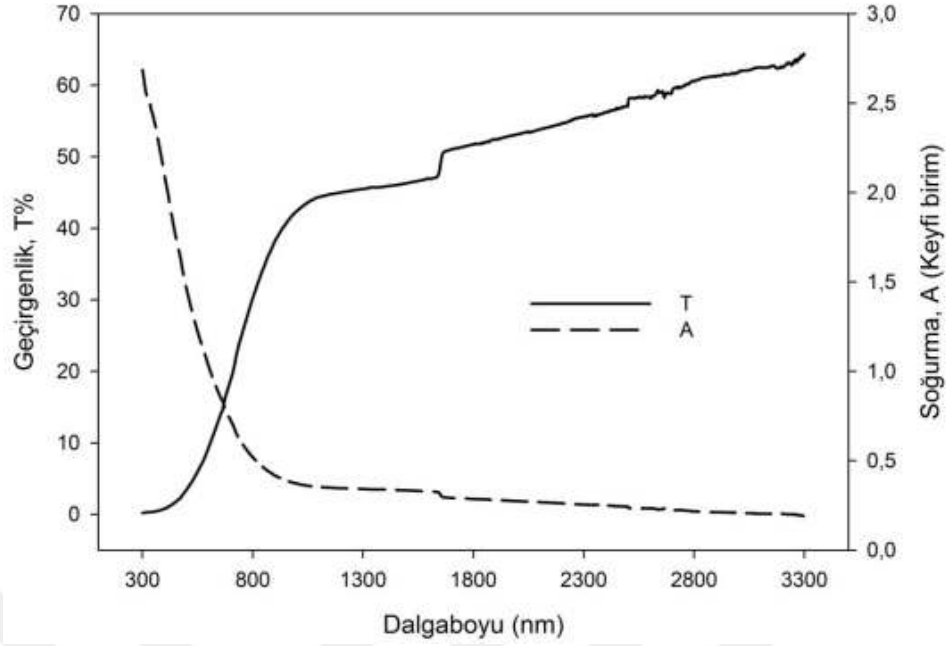
Şekil 6.18. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.

Şekil 6.18’de üretilen In katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen In katkılı GaAs ince filmin 300-700 nm dalgaboyu aralığında %3 civarında sabit bir geçirgenliğe sahip olduğu, geçirgenliğin 700 nm’den 850 nm’ye keskin bir azalış göstererek %1’e düştüğü, 850 nm’den 1500 nm’ye kadar ise artış göstererek %15’e yükseldiği 1500 nm’den sonra %15 ile %26 arasında değişen değerler aldığı görülmektedir. Geçirgenliğin en yüksek ($T=\%26$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 2600 nm’dir. İkinci ($T=\%23$), üçüncü ($T=\%22$) ve dördüncü ($T=\%21$) en yüksek geçirgenlik değerleri ise 3270 nm, 3180 nm ve 1900 nm dalgaboylarına tekabül etmektedir. Soğurma ise 300-700 nm dalgaboyu aralığında sabit olup 850 nm’den sonra geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek geçirgenlik azaldığında artmış, arttığında ise azalmıştır.



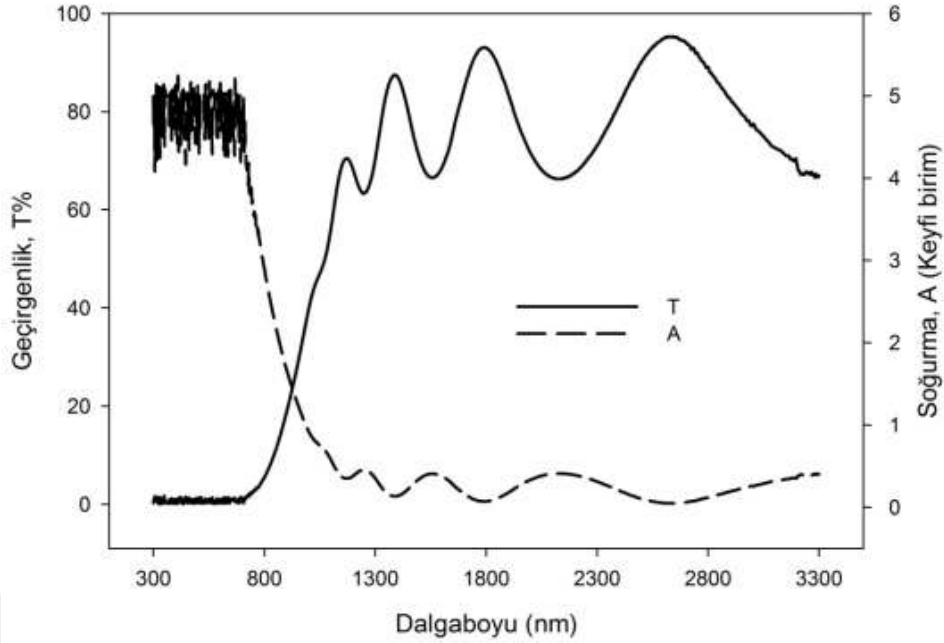
Şekil 6.19. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları (Pat vd., 2016a).

Şekil 6.19’da üretilen C katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen C katkılı GaAs ince filmin geçirgenliğinin 300 nm’den 1650 nm’ye kadar hızlı bir biçimde artış göstererek %11’den %91’e ulaştığı, 1650 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça artmaya devam ettiği ve 3300 nm’de $T = 99\%$ değerini aldığı görülmektedir. Soğurma ise geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek 300 nm dalgaboyundan başlayarak 1650 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir azalma göstermiş 1650 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça azalmaya devam etmiştir.



Şekil 6.20. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.

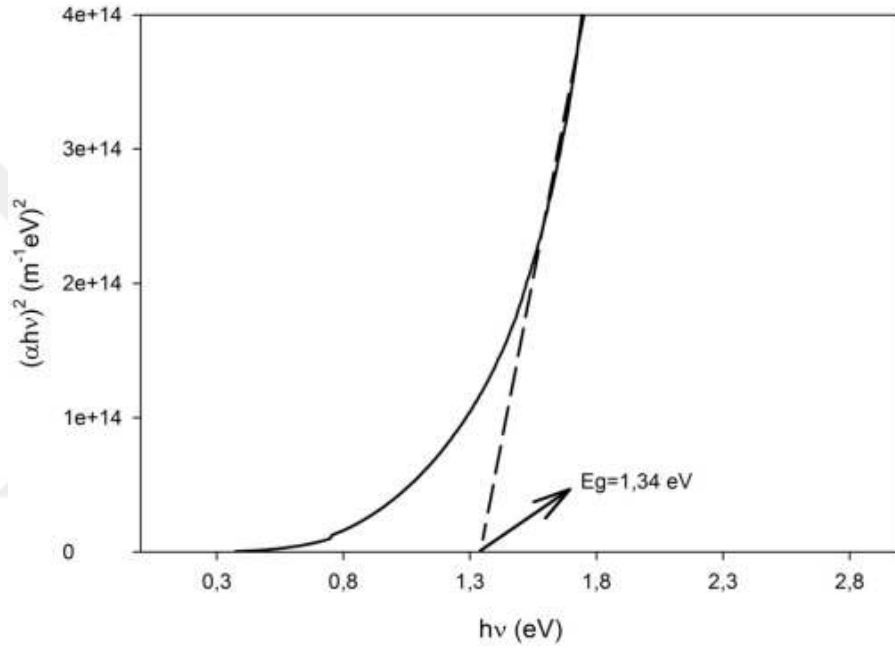
Şekil 6.20’de üretilen Si katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Si katkılı GaAs ince filmin 300-400 nm dalgaboyu aralığında geçirgenliğe sahip olmadığı, geçirgenliğin 400 nm’den 1000 nm’ye kadar hızlı bir biçimde artış göstererek %43’e ulaştığı, 1000 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça artmaya devam ettiği ve 3300 nm’de $T = 65\%$ değerini aldığı görülmektedir. Soğurma ise geçirgenliğin tam tersi bir davranış göstererek 300 nm dalgaboyundan başlayarak 1000 nm dalgaboyuna kadar hızlı bir azalma göstermiş 1000 nm’den sonra da artan dalgaboyu ile birlikte yavaşça azalmaya devam etmiştir.



Şekil 6.21. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları.

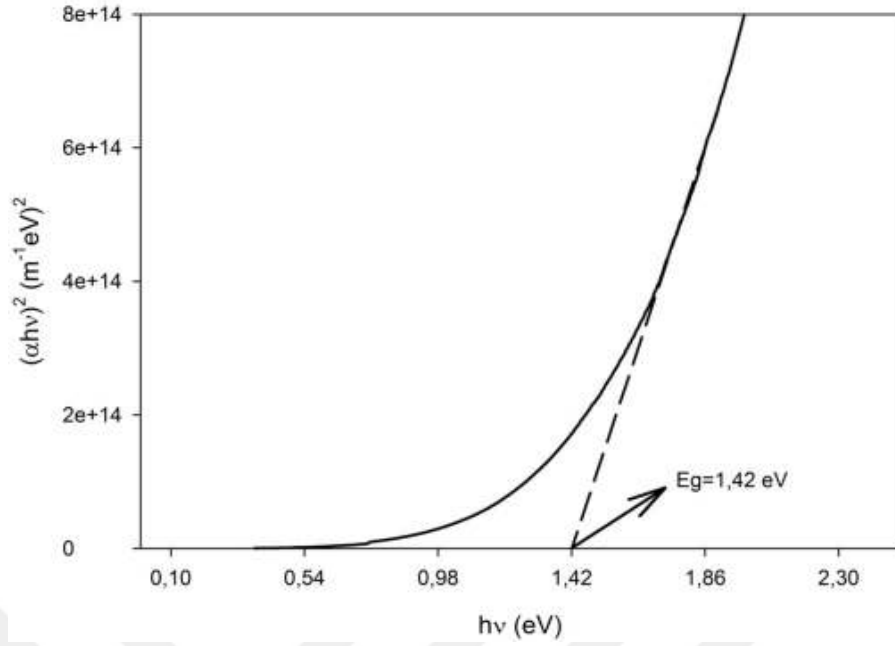
Şekil 6.21’de üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin geçirgenlik ve soğurma spektrumları verilmektedir. Bu şekilde, üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin 300-700 nm dalgaboyu aralığında geçirgenliğe sahip olmadığı, geçirgenliğin 700 nm’den 1200 nm’ye kadar hızlı bir biçimde artış göstererek %70’e ulaştığı ve 1200 nm’den sonra %65 ile %95 arasında değişen değerler aldığı görülmektedir. Geçirgenliğin en yüksek ($T=\%95$) olduğu dalgaboyu yaklaşık olarak 2600 nm’dir. İkinci ($T=\%92$) ve üçüncü ($T=\%86$) en yüksek geçirgenlik değerleri ise 1800 nm ve 1350 nm dalgaboylarına tekabül etmektedir. Geçirgenlik spektrumunda gözlenen girişim saçakları ince film üzerine gelen ışığın ince film-cam ve ince film-hava ara yüzeylerinden geçerken uğradığı çoklu yansımalar sonucunda oluşup film yüzeyinin oldukça düz ve pürüzsüz olduğunu göstermektedir. Ayrıca, filmin kalınlığının düzgün olması da, girişim etkilerinin meydana getirdiği minimum ve maksimumlardan oluşan desenlerin belirginleşmesine sebep olmuştur. Soğurma ise 300-700 nm dalgaboyu aralığında oldukça yüksek olup 700 nm’den 1200 nm’ye kadar hızlı bir azalma göstermiş 1200 nm’den sonra da geçirgenlik arttığında azalmış, azaldığında ise artmıştır.

Elde edilen soğurma değerleri, üretilen ince filmlerin yasak enerji aralıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^{1/n}$ grafikleri n 'in direkt ve indirekt geçişler için alabileceği değerler (1/2, 3/2, 2, 3) için çizilmiştir. n yerine 1/2 konulduğunda en iyi doğrusallık belirlenmiştir. Grafiklerdeki doğrusal kısımlar $h\nu$ eksenini kesecek şekilde uzatılarak filmlerin yasak enerji aralıkları belirlenmiştir. Üretilen filmler için $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ ilişkileri Şekil 6.22 ile Şekil 6.28 arasında verilmektedir.



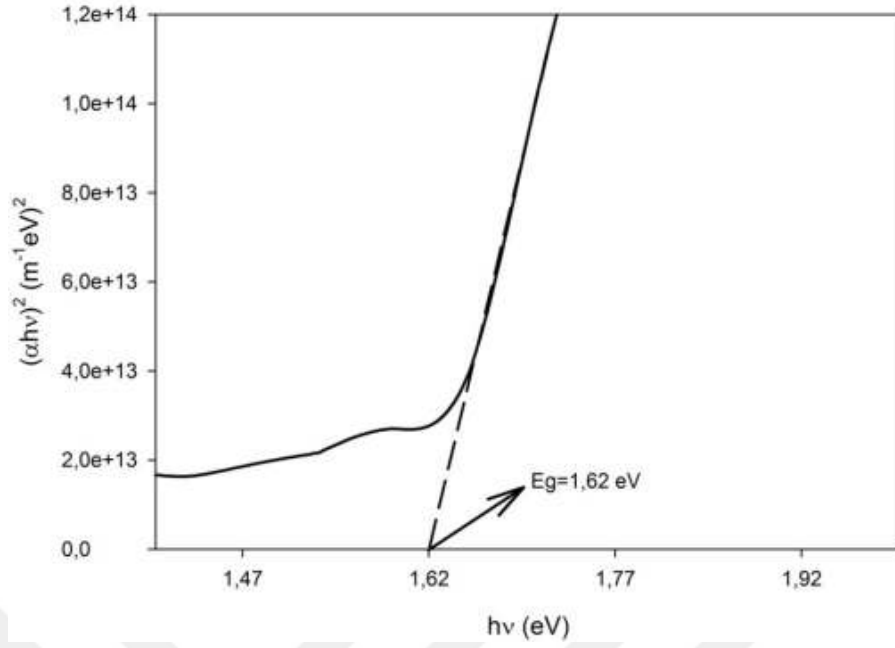
Şekil 6.22. Üretilen GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği (Pat vd., 2015a).

Şekil 6.22'de üretilen GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ 'da kestiği nokta üretilen GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,34 eV olarak bulunur. Bu değer literatür ile uyumludur (Rasha vd., 2008).



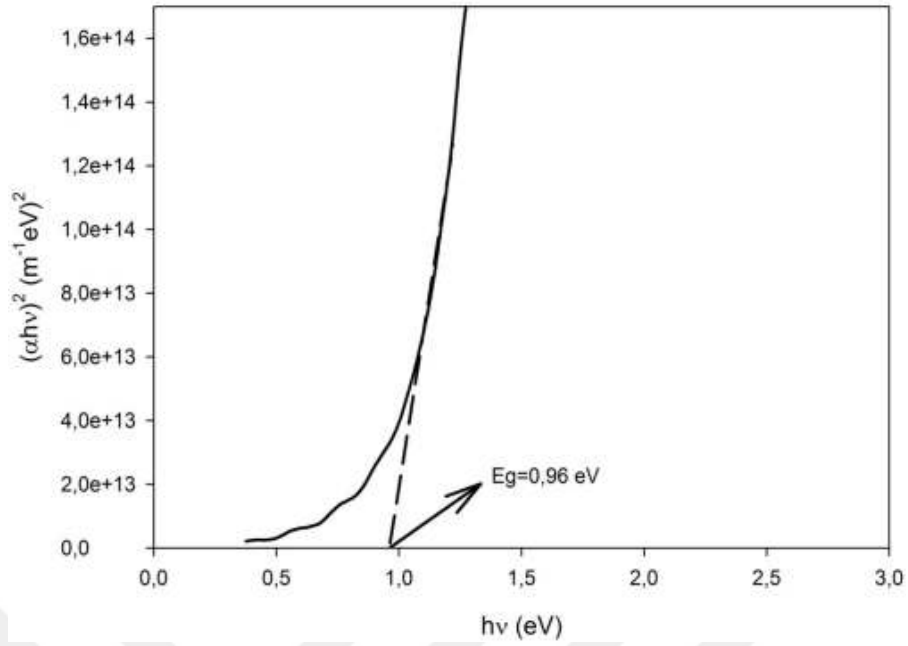
Şekil 6.23. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ grafiği (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.23'te üretilen Co katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği nokta üretilen Co katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,42 eV olarak bulunur. Bu değer literatür ile uyumludur (Baranowski vd., 1972).



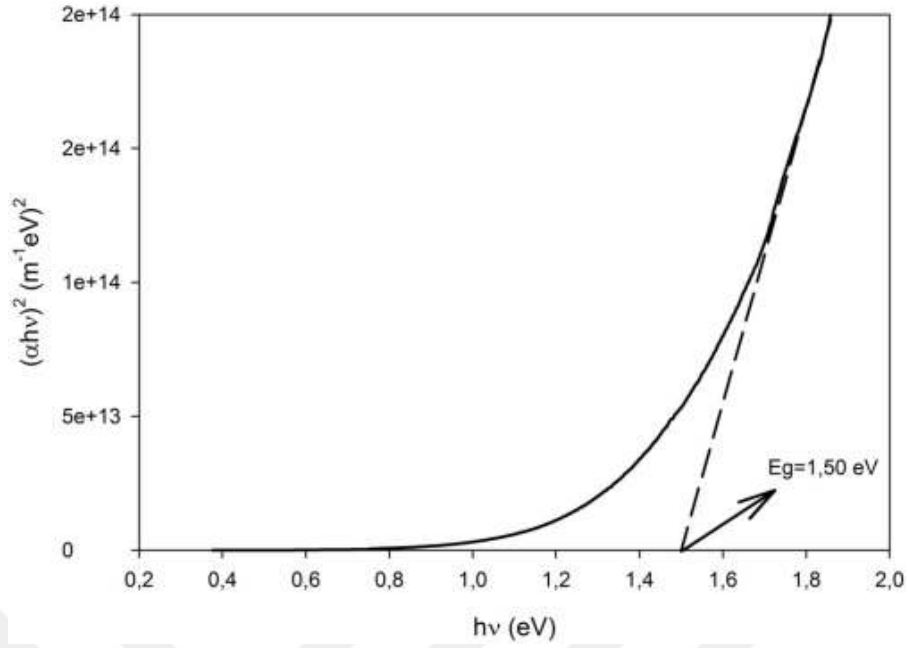
Şekil 6.24. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği.

Şekil 6.24'te üretilen Al katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ 'da kestiği nokta üretilen Al katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,62 eV olarak bulunur. Bu değer literatürde rapor edilen değerlerden daha düşüktür (Sitarek vd., 2000; Rutkowska vd., 2011).



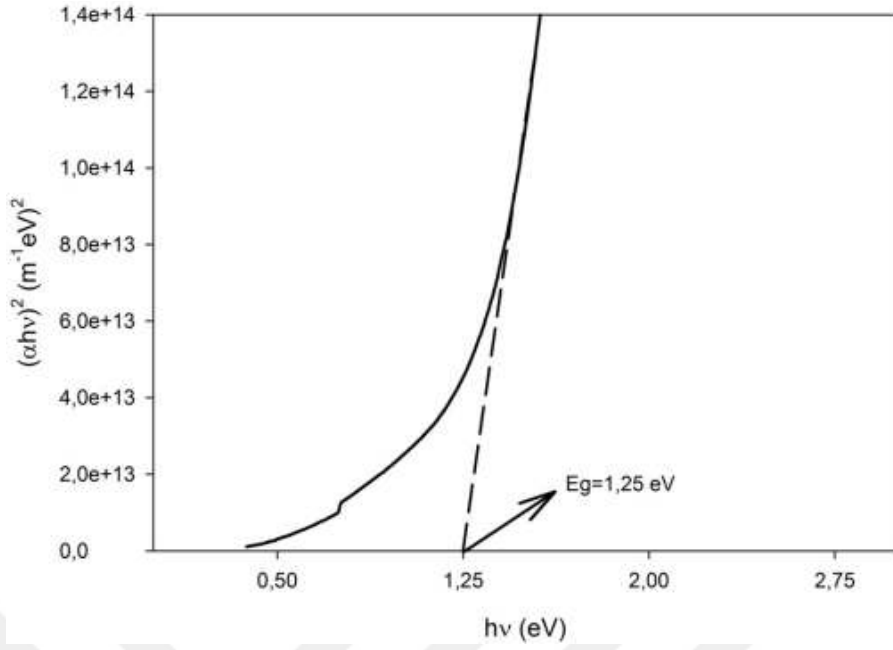
Şekil 6.25. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ -hv grafiği (Pat vd., 2015c).

Şekil 6.25'te üretilen In katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ -hv grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının hv eksenini $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği nokta üretilen In katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 0,96 eV olarak bulunur. Bu değer literatür ile uyumludur (Metzger vd., 2001).



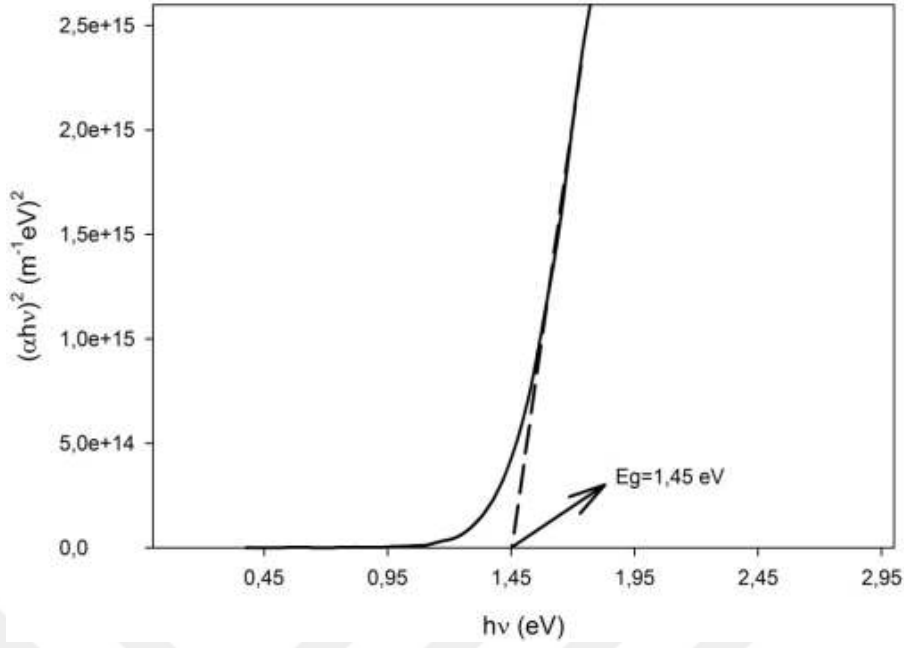
Şekil 6.26. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ -hv grafiği (Pat vd., 2016a).

Şekil 6.26’da üretilen C katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ -hv grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının hv eksenini $(\alpha hv)^2=0$ ’da kestiği nokta üretilen C katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,50 eV olarak bulunur. Bu değer literatür ile uyumludur (Cho vd., 1998; Maaßdorf vd., 2002; Reyes vd., 2009).



Şekil 6.27. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği.

Şekil 6.27’de üretilen Si katkılı GaAs ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafiği verilmektedir. Bu grafiğin lineer kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ ’da kestiği nokta üretilen Si katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,25 eV olarak bulunur. Bu değer literatürde rapor edilen değerden daha düşüktür (Kressel, 1968).



Şekil 6.28. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ grafiği.

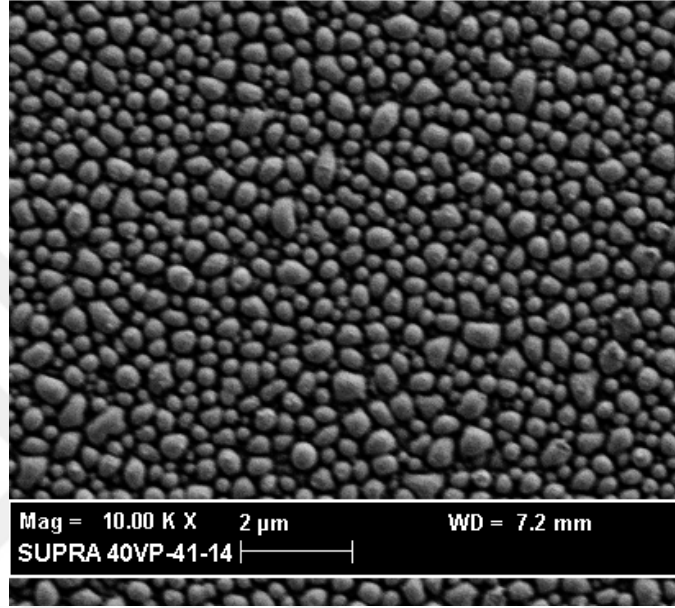
Şekil 6.28’de üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ grafiği verilmektedir. Bu grafiğin linear kısmının $h\nu$ eksenini $(\alpha hv)^2=0$ ’da kestiği nokta üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin yasak enerji aralığını verir. Buna göre yasak enerji aralığı 1,45 eV olarak bulunur. Bu değer literatür ile uyumludur (Rosztoczy, 1970).

6.4. İletkenlik Tipinin Belirlenmesi

Üretilen filmlerin İletkenlik tipinin belirlenmesi için sıcak metodu kullanılarak bir dakika süre ile gözlem yapılmış ve multimetrenin voltmetre bölümünde okunan değerlerin pozitif olması nedeni ile üretilen katkılanmamış GaAs ve Co, In, C, Si katkılanmış GaAs filmlerin n-tipi yarıiletkenler olduğu belirlenmiştir. Yani bu filmlerin çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır. Voltmetre bölümünde okunan değerlerin negatif olması nedeni ile de hazırlanan Al ve Ge katkılanmış GaAs filmlerin p-tipi olduğu anlaşılmıştır. Bu filmlerin çoğunluk yük taşıyıcıları ise hollerdir.

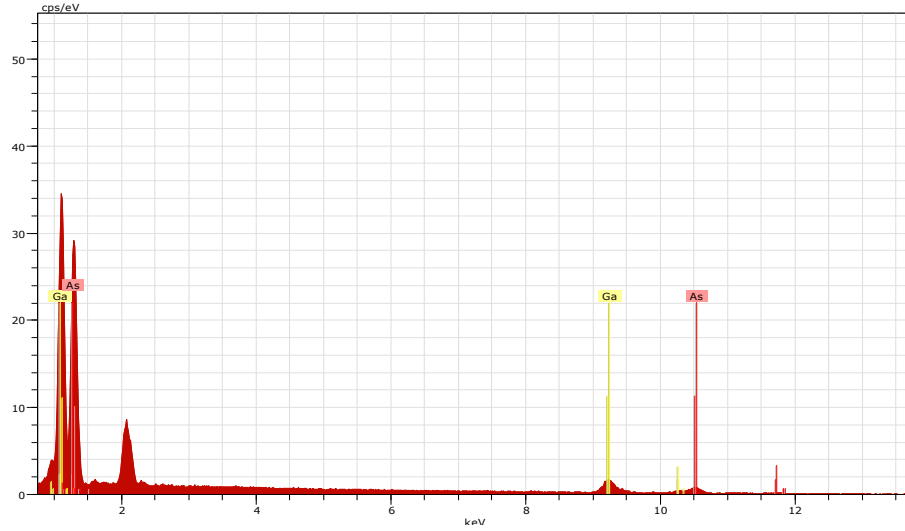
6.5. FESEM ve EDS Çalışmaları

Üretilen filmlerin iki boyutlu FESEM görüntüleri ve EDS spektrumları Şekil 6.29 ile Şekil 6.42 arasında gösterilmektedir.



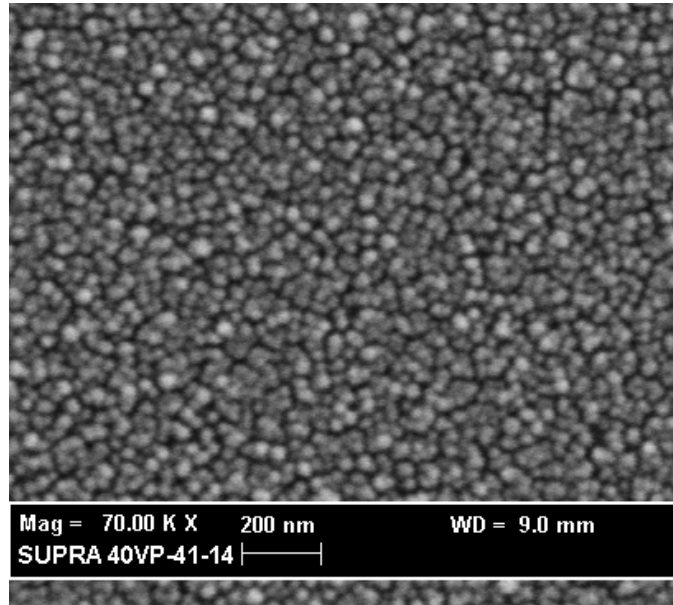
Şekil 6.29. Üretilen GaAs ince filmin 10000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü.

Şekil 6.29’da üretilen GaAs ince filmin FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin, sınırları oldukça belirgin, 200-250 nm civarında genişliğe sahip yuvarlak tanelerden meydana gelen bir mikro yapısı olduğu, taneler arasında görülen boşlukların çok yoğun olmadığı ve cam alttaşın homojen bir şekilde tamamen kaplandığı görülmektedir.



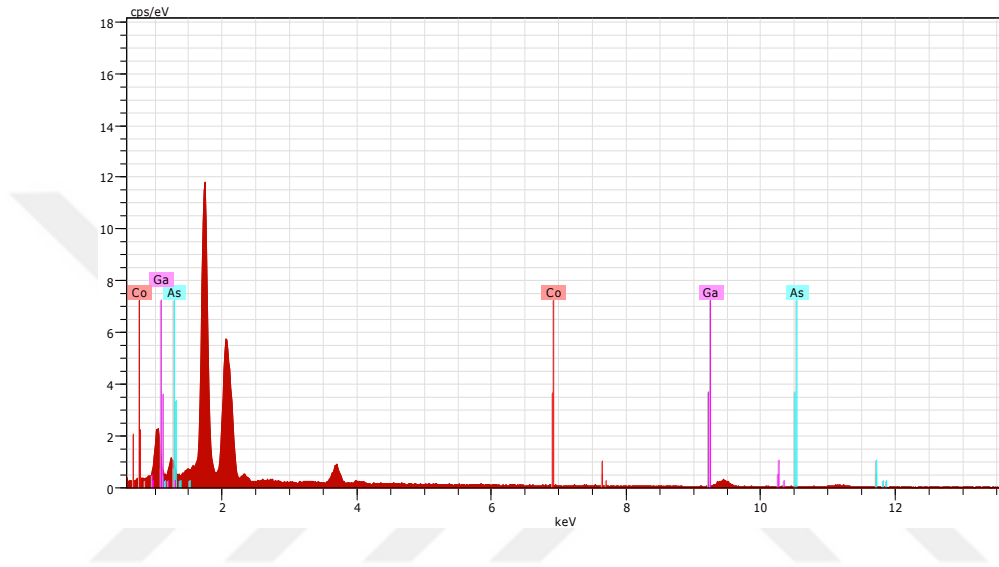
Şekil 6.30. Üretilen GaAs ince filmin EDS spektrumu (Pat vd., 2015a).

Şekil 6.30’da üretilen GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %66 galyum ve %34 arsenik, atomik olarak ise %68 galyum ve %32 arsenik bulunduğunu ortaya koymaktadır.



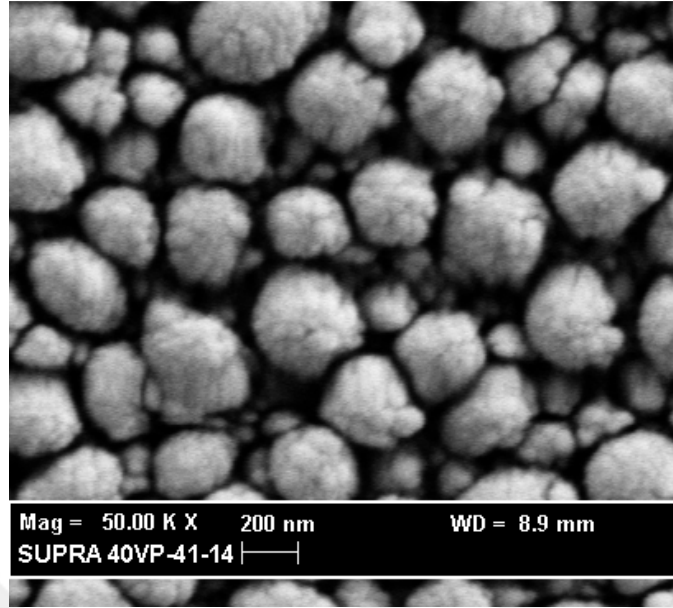
Şekil 6.31. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.31’de üretilen Co katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin, sınırları belirgin, 30 nm civarında genişliğe sahip yuvarlak tanelerden meydana gelen bir mikro yapısı olduğu, taneler arasında boşlukların pek görülmediği, cam alttaşın homojen bir şekilde tamamen kaplandığı ve film yüzeyinin çatlaksız, düz ve pürüzsüz olduğu görülmektedir.



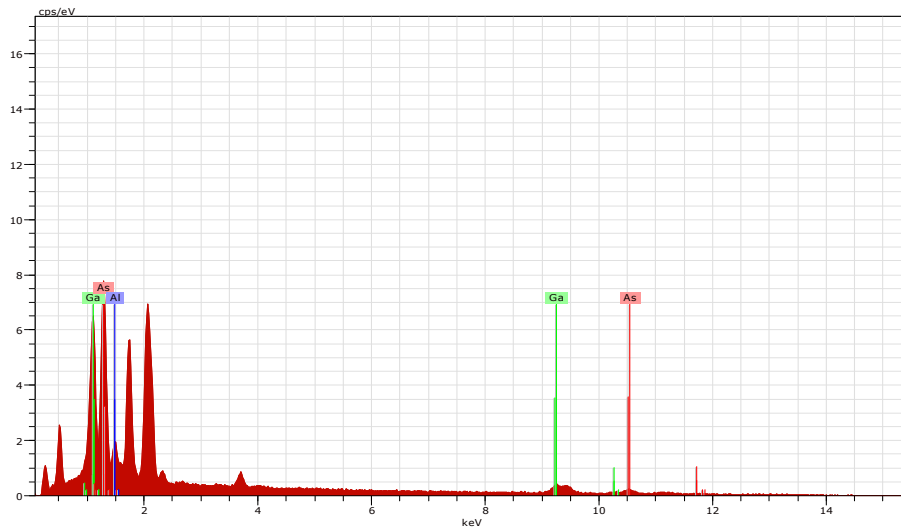
Şekil 6.32. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.32’de üretilen Co katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %51 galyum, %48 arsenik ve %1 kobalt, atomik olarak ise %52 galyum, %46 arsenik ve %2 kobalt bulunduğunu ortaya koymaktadır.



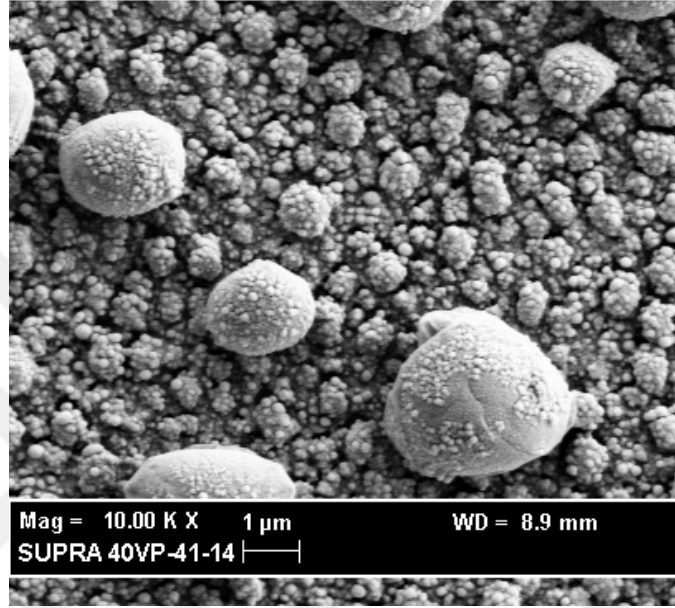
Şekil 6.33. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Özen vd., 2015f).

Şekil 6.33'te üretilen Al katkılı GaAs ince filmin iki boyutlu FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin, sınırları oldukça belirgin, çapları 100 ile 300 nm arasında değişen yuvarlak tanelerden meydana gelen bir mikro yapısı olduğu, taneler arasında boşlukların var olduğu fakat çok yoğun olmadığı ve bununla birlikte cam alttaşın tamamen kaplandığı görülmektedir.



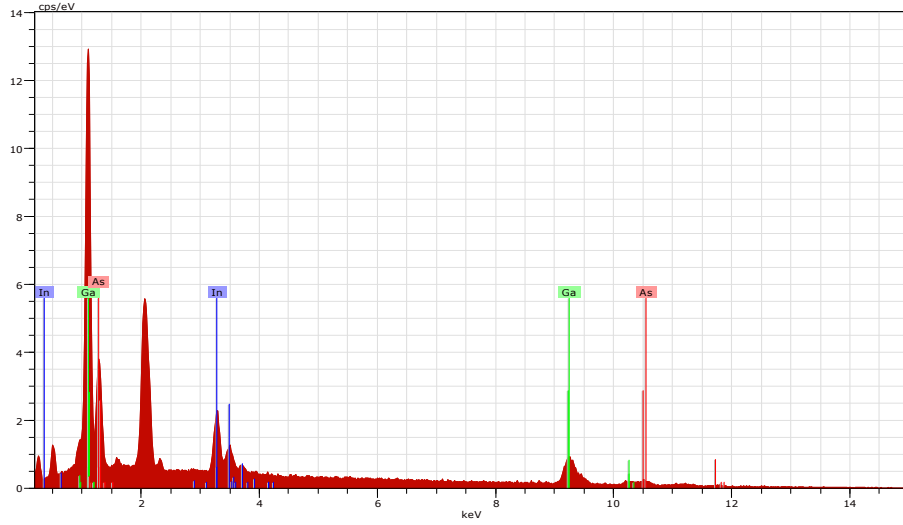
Şekil 6.34. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.

Şekil 6.34'te üretilen Al katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %42 galyum, %32 arsenik ve %26 alüminyum, atomik olarak ise %31 galyum, %21 arsenik ve %48 alüminyum bulunduğunu ortaya koymaktadır.



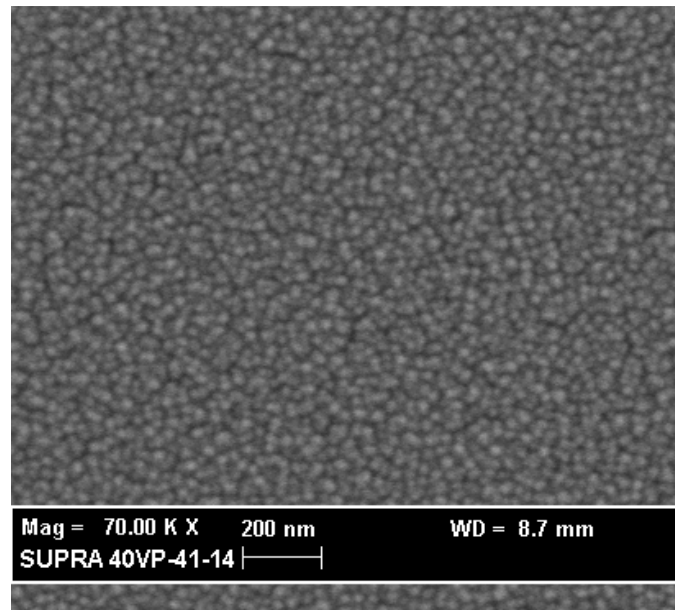
Şekil 6.35. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Pat vd., 2015c).

Şekil 6.35'te üretilen In katkılı GaAs ince filmin iki boyutlu FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin yüzeyinde çapları 50 ile 200 nm arasında değişen yuvarlak tanelerin bir araya gelmesiyle oluşan 1-2 μm genişliğindeki yuvarlak büyük kristallerin olduğu ve film yüzeyinin görünen daha alt kısımlarında ise üzüm salkımına benzeyen daha küçük kristallerin bulunduğu görülmektedir. Morfolojinin aglomere bir yapı şeklinde ortaya çıkması tanelerin birbirleri arasındaki çekim kuvvetinin çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



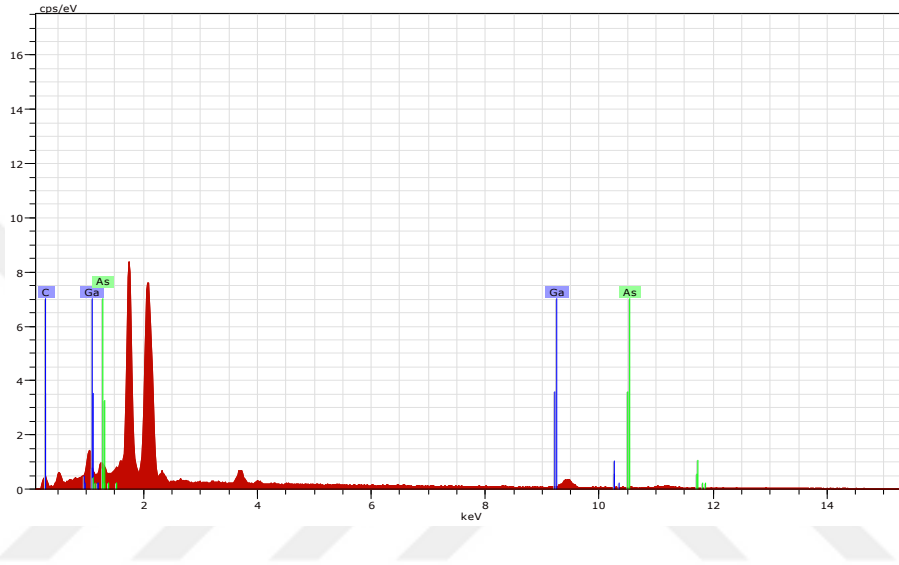
Şekil 6.36. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu (Pat vd., 2015c).

Şekil 6.36’da üretilen In katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %65 galyum, %21 arsenik ve %14 indiyum, atomik olarak ise %70 galyum, %21 arsenik ve %9 indiyum bulunduğunu ortaya koymaktadır.



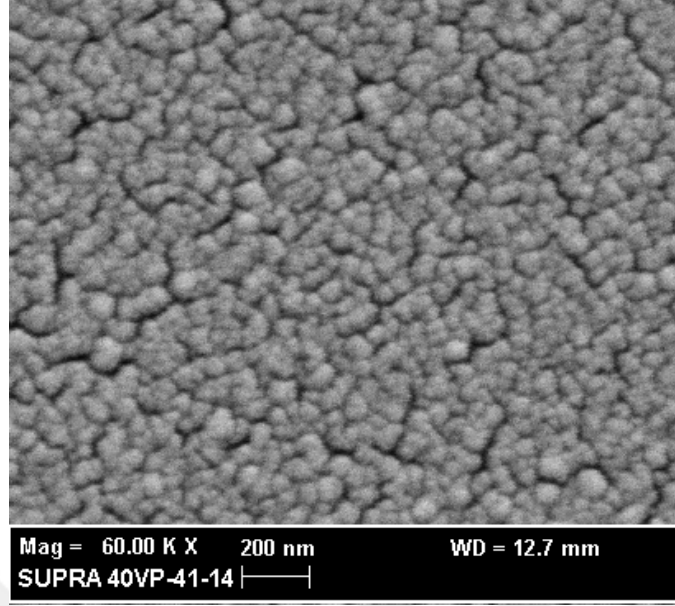
Şekil 6.37. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Pat vd., 2016a).

Şekil 6.37’de üretilen C katkılı GaAs ince filmin iki boyutlu FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin, sınırları belirgin 20 nm civarında genişliğe sahip yuvarlak tanelerden meydana gelen bir mikro yapısı olduğu, taneler arasında boşlukların olmadığı, cam alttaşın homojen bir şekilde tamamen kaplandığı ve film yüzeyinin çatlaksız, düz ve pürüzsüz olduğu görülmektedir.



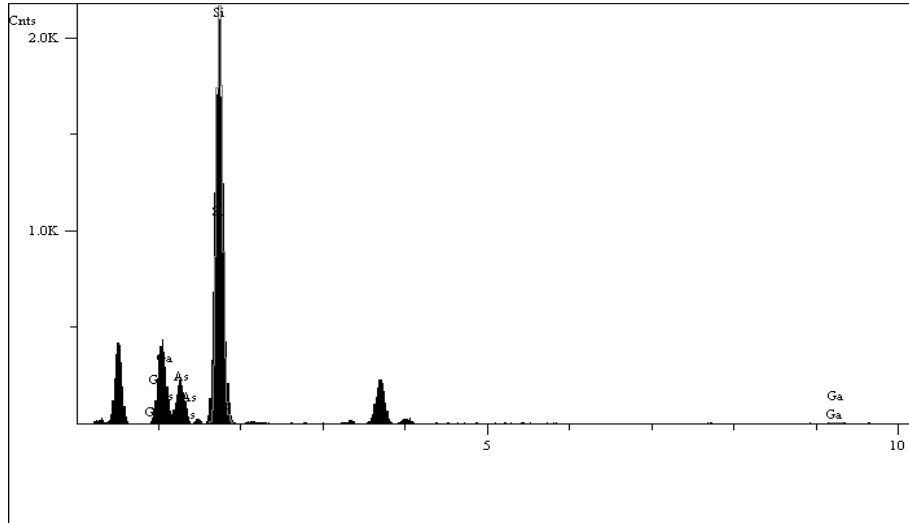
Şekil 6.38. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.

Şekil 6.38’de üretilen C katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %50 galyum, %17 arsenik ve %33 karbon, atomik olarak ise %20 galyum, %6 arsenik ve %74 karbon bulunduğunu ortaya koymaktadır.



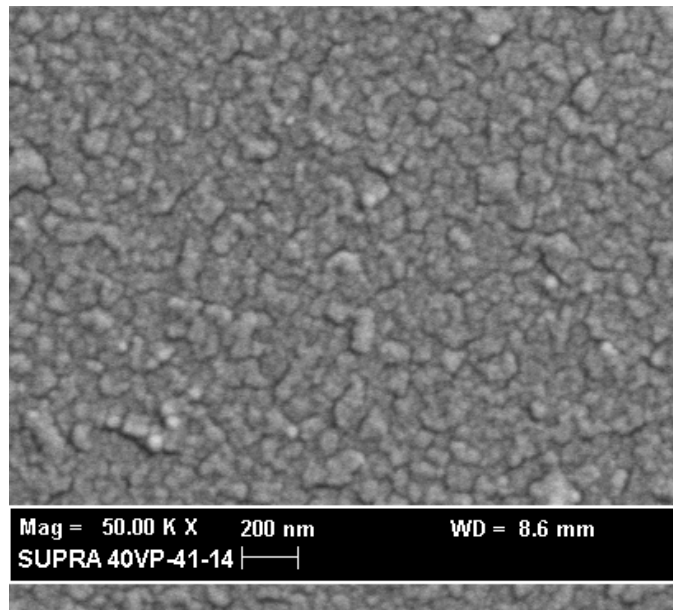
Şekil 6.39. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Şenay vd., 2015c).

Şekil 6.39’da üretilen Si katkılı GaAs ince filmin iki boyutlu FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, incelenen filmin, sınırları belirgin 40-50 nm civarında genişliğe sahip yuvarlak tanelerden meydana gelen bir mikro yapısı olduğu, yüzeyin düz ve pürüzsüz olduğu bununla birlikte bazı bölgelerde mikro çatlakların bulunduğu görülmektedir. Görülen mikro çatlakların oluşma sebebi filmin tercihli büyüme yönlerinde çok düzlemli çekirdeklenme ve büyüme olmasıdır.



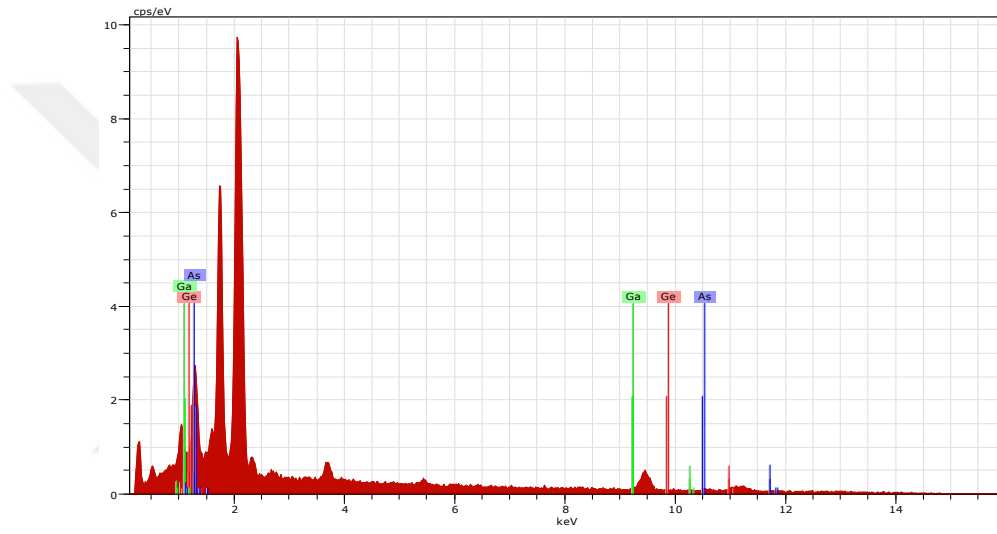
Şekil 6.40. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.

Şekil 6.38’de üretilen Si katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %4 galyum, %8 arsenik ve %88 silisyum, atomik olarak ise %2 galyum, %3 arsenik ve %95 silisyum bulunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.41. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin FESEM görüntüsü (Pat vd., 2016b).

Şekil 6.41’de üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin iki boyutlu FESEM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, Ge katkılanmış GaAs film yüzeyinin diğer filmlere kıyasla çok daha düz ve pürüzsüz olduğu görülmektedir. Tane sınırları net olmadığı için tane boyutları tam olarak belirlenememiştir. Düz ve pürüzsüz bir yüzeyin elde edilmesi en küçük kararlı çekirdekçiklerin iki boyutta genişlemesi ile açıklanabilir. Buna göre film büyümesi düzlemsel tabakalar şeklinde gerçekleşmiştir. Bu tür film büyümesinde adatomların yüzeye olan adsorpsiyonları kendi aralarındaki adsorpsiyonlarından çok daha yüksektir.

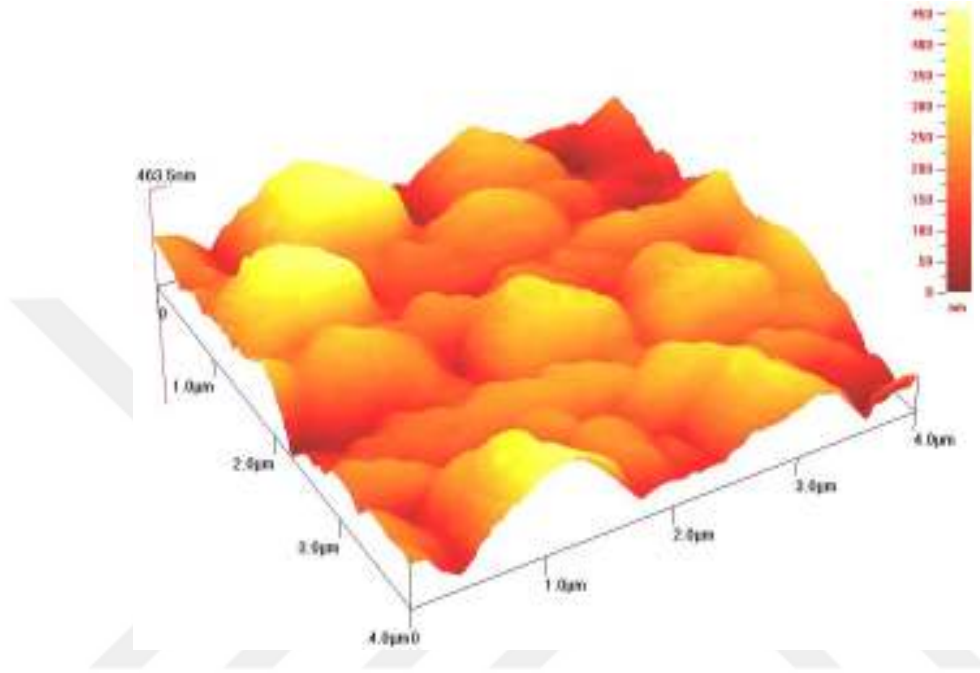


Şekil 6.42. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu.

Şekil 6.42’de üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin EDS spektrumu gösterilmektedir. EDS sonucu, film yüzeyinde ağırlık bakımından %39 galyum, %60 arsenik ve %1 germanyum, atomik olarak ise %41 galyum, %58 arsenik ve %1 germanyum bulunduğunu ortaya koymaktadır.

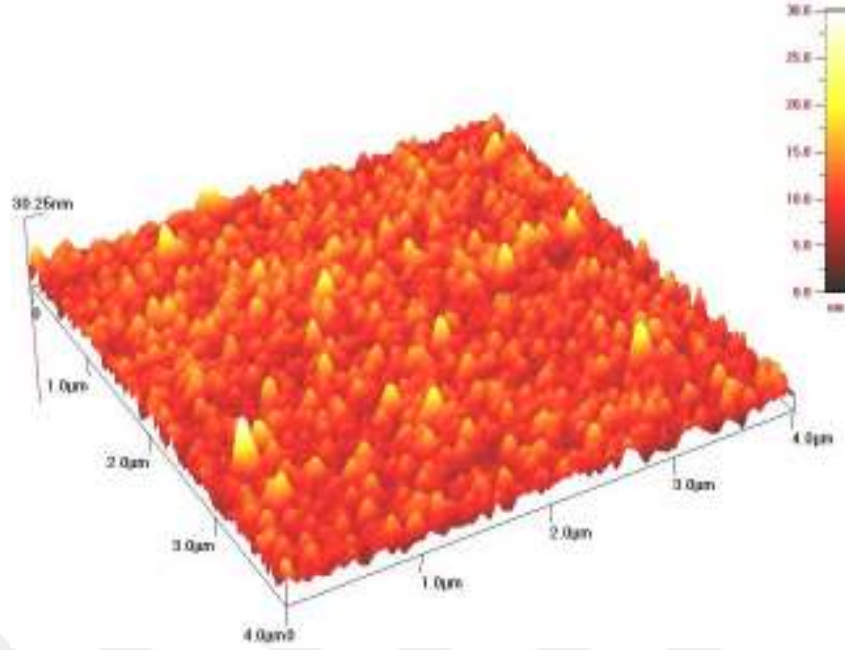
6.6. Atomik Kuvvet Mikroskobu Çalışmaları

Üretilen filmlerin atomik kuvvet mikroskobu çalışmalarından elde edilen üç boyutlu yüzey görüntüleri Şekil 6.43 ile Şekil 6.49 arasında verilmektedir.



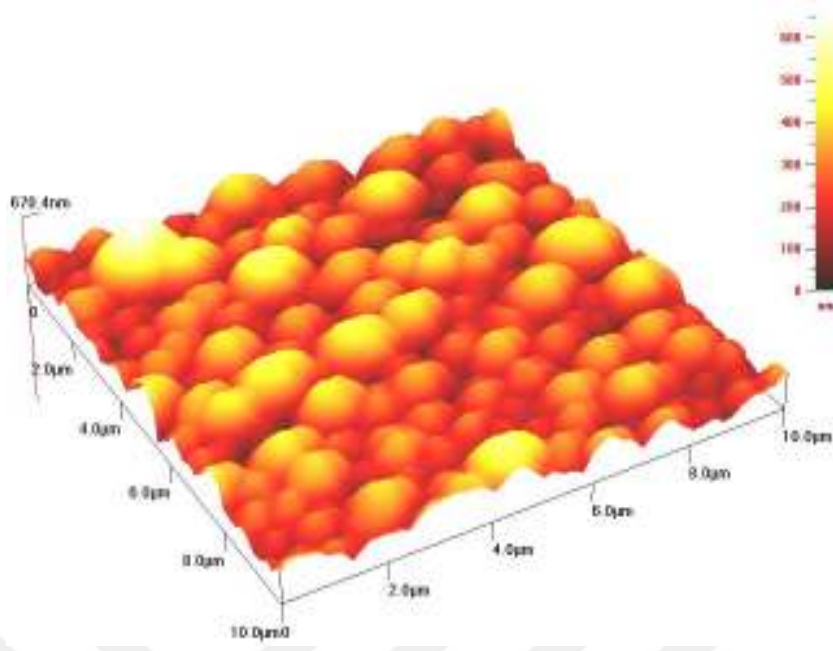
Şekil 6.43. Üretilen GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Pat vd., 2015a).

Şekil 6.43'te üretilen GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, yüksek tepeleri temsil eden sarı bölgeler çukurları temsil eden siyah bölgelerden daha fazla olduğu için GaAs ince film yüzeyinin yüksek tepelerin yoğun olduğu hemen hemen homojen bir görünüm sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, film yüzeyinde görülen oldukça büyük yuvarlak tanelerin boyutlarının birbirlerine yakın olduğu da söylenebilir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 463,50 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 58,80 nm, 70,50 nm, 160,80 nm, 0,70 ve 0,45'dir.



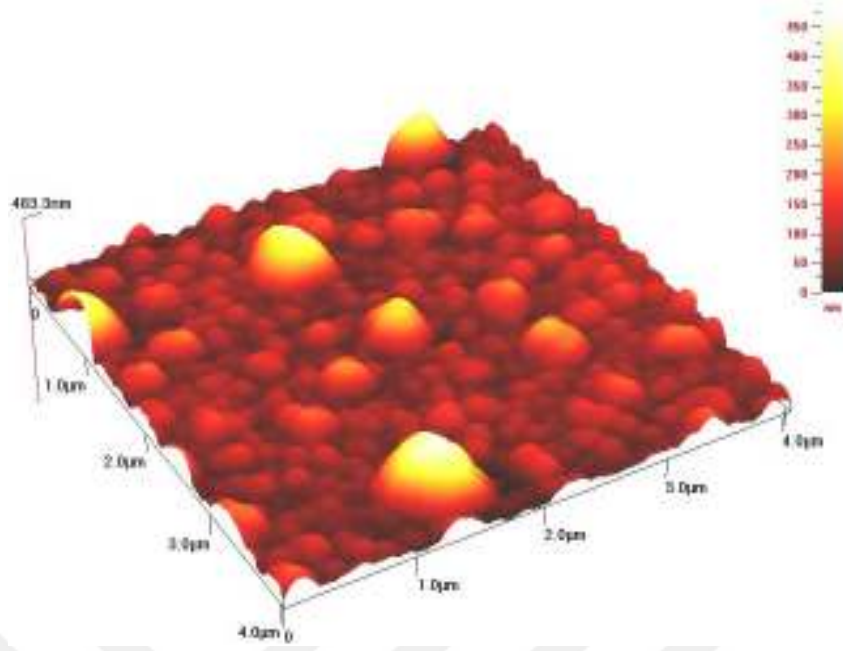
Şekil 6.44. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Şenay vd., 2016b).

Şekil 6.44'te üretilen Co katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, Co katkılı GaAs film yüzeyinin tabandan yukarıya doğru sıvrılarak büyüyen yaklaşık 100-120 nm genişliğindeki sıkı paketlenmiş tanelerden oluştuğu, yer yer tane boşlukları içerdiği fakat 5 ile 15 nm arasında değişen yüksekliğe sahip tepelerin yoğun olduğu homojen bir görünüm sergilediği görülmektedir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 30,25 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 2,13 nm, 2,72 nm, 9,18 nm, 0,61 ve 1,34'tür.



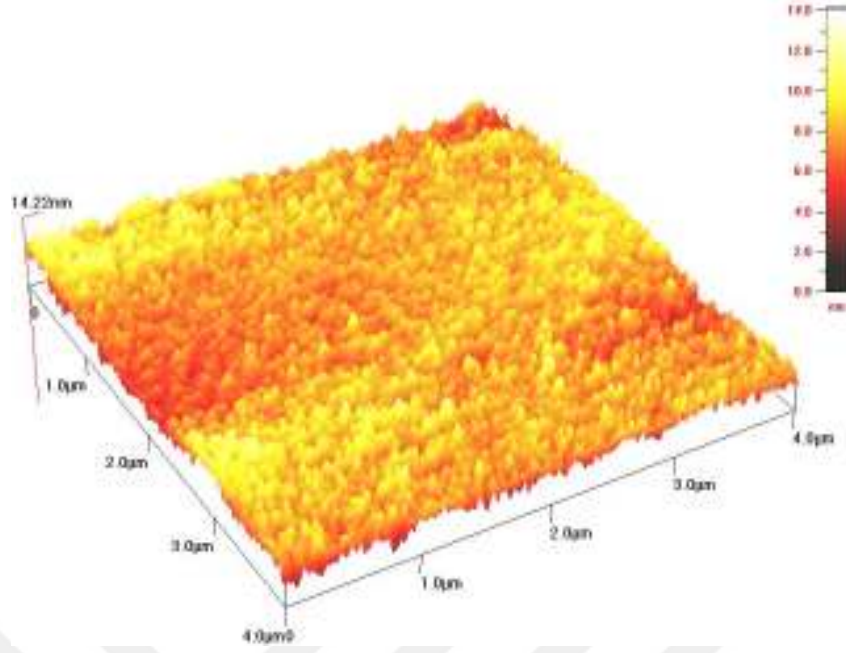
Şekil 6.45. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Özen vd., 2015f).

Şekil 6.45'te üretilen Al katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, Al katkılı GaAs ince film yüzeyinin çok homojen bir görünüme sahip olmayıp irili ufaklı yuvarlak tanelerden oluştuğu görülmektedir. Bu gözlemler, FESEM çalışmalarından elde edilen sonuçları desteklenmektedir. Bununla birlikte, hem çukur bölgelerin ve hem de çok yüksek tepelerin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Bu durum pürüzlülüğün yüksek olmasına sebep olur. Aşırı derecede pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesi ise film oluşumunun Volmer-Weber mekanizması ile gerçekleştiğini işaret etmektedir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 670,40 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 76,60 nm, 93,60 nm, 262,40 nm, 0,53 ve 0,18'dir.



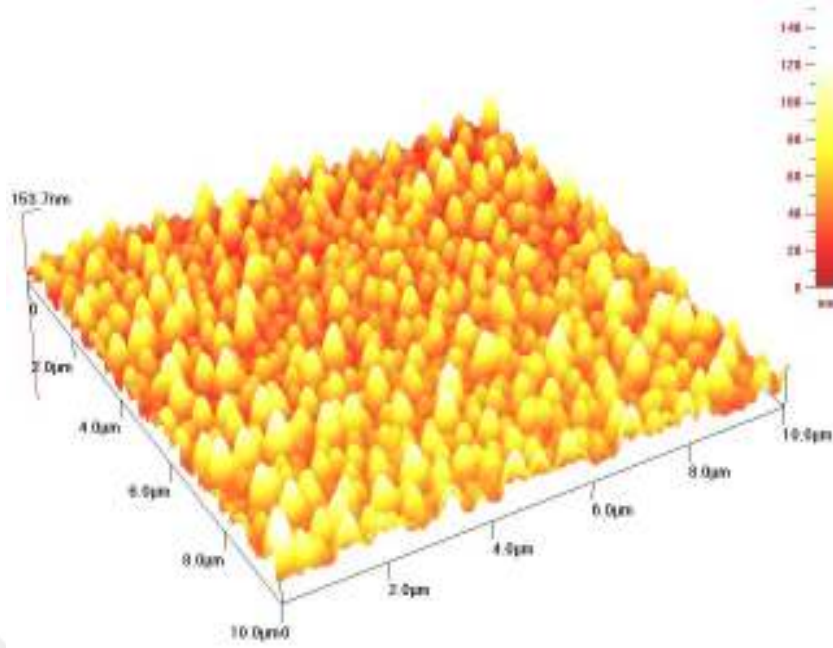
Şekil 6.46. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Pat vd., 2015c).

Şekil 6.46’da üretilen In katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, üretilen diğer filmlerden farklı olarak In katkılı GaAs film yüzeyindeki çukur bölgelerin yoğunluğunun oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, yüzeyin bazı bölgelerinde farklı yükseklik ve büyüklüklerde yığılmaların olduğu dikkat çekmektedir. Bunun, bazı küçük boyutlu tanelerin birbirleriyle birleşerek daha büyük boyutlu tanelere dönüşmesinden kaynaklandığı ve bu durum dikkate alındığında film oluşumunun ada tipi büyüme şeklinde gerçekleştiği söylenebilir. Bu gözlem, FESEM çalışmalarından elde edilen sonuçları desteklenmektedir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı ise 483,30 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 45,10 nm, 58,10 nm, 99,71 nm, 2,42 ve 7,56’dır.



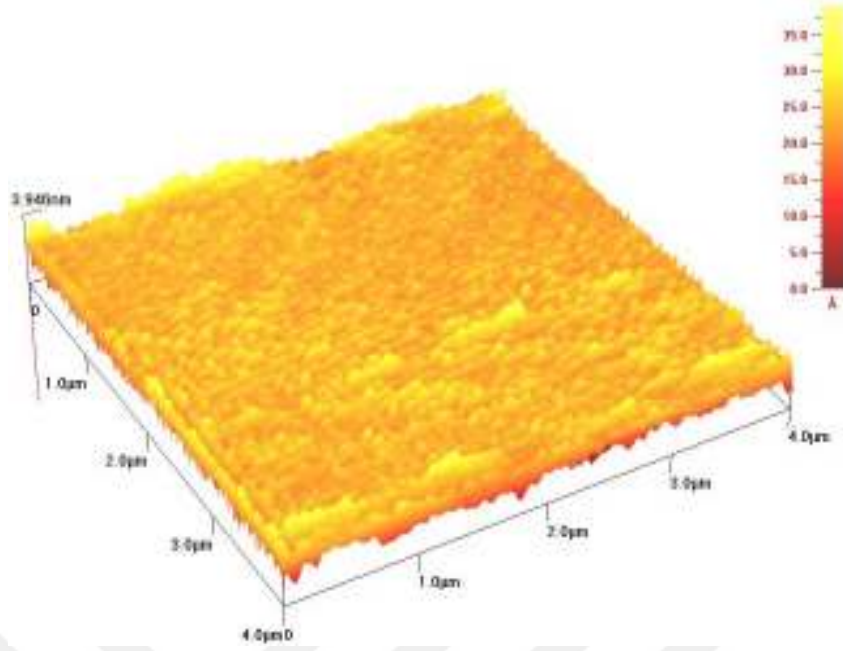
Şekil 6.47. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Pat vd., 2016a).

Şekil 6.47’de üretilen C katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, C katkılı GaAs film yüzeyinin tabandan yukarıya doğru sıvrılarak büyüyen sıkı paketlenmiş oldukça küçük tanelerden oluştuğu ve 5 ile 14 nm arasında değişen yüksekliğe sahip tepelerin yoğun olduğu homojen bir görünüm sergilediği görülmektedir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 14,22 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 1,04 nm, 1,29 nm, 6,92 nm, 0,04 ve 0,26’dır.



Şekil 6.48. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü (Şenay vd., 2015c).

Şekil 6.48’de üretilen Si katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, Si katkılı GaAs film yüzeyinin tabandan yukarıya doğru sivrilerek büyüyen yaklaşık 350-400 nm genişliğindeki sıkı paketlenmiş tanelerden oluştuğu ve yüksek tepelerin yoğun olduğu homojen bir görünüm sergilediği görülmektedir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 153,70 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 14,50 nm, 18,00 nm, 48,32 nm, 0,85 ve 0,71’dir.

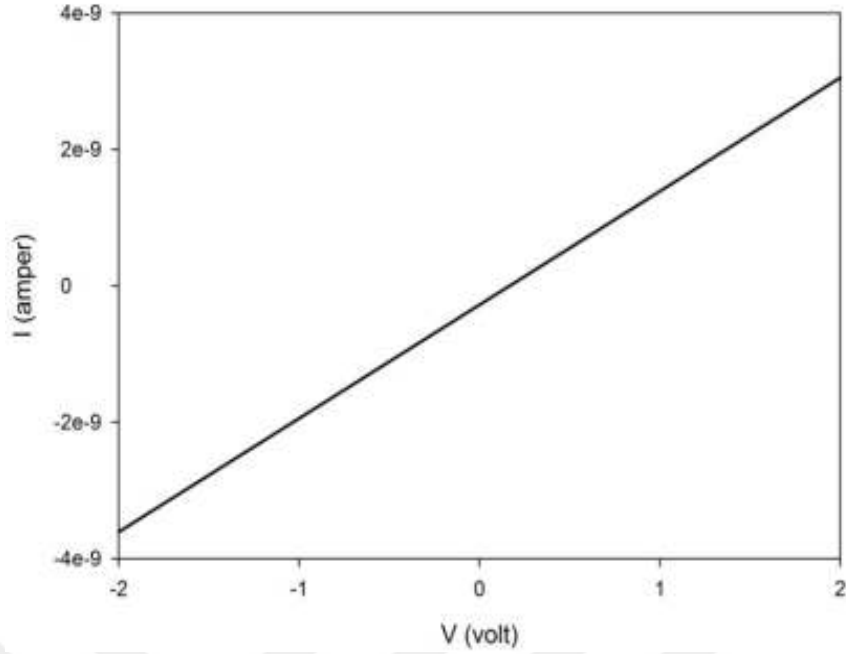


Şekil 6.49. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin 3D AFM görüntüsü.

Şekil 6.49’da üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin üç boyutlu AFM görüntüsü verilmektedir. Bu şekilde, Ge katkılanmış GaAs film yüzeyinin diğer filmlere kıyasla çok daha düz, pürüzsüz ve homojen olduğu görülmektedir. Bu gözlem, UV/VIS/NIR spektroskopisi ve FESEM çalışmalarından elde edilen sonuçları desteklemektedir. Film yüzeyinde görülen oldukça düşük yükseklikteki bölgeler göz önünde bulundurulduğunda, filmin tabaka büyümesi ile oluştuğu söylenebilir. Şekildeki en yüksek tepe ile en çukur bölge arasındaki yükseklik farkı 3,946 nm olup ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü, ortalama yükseklik, çarpıklık ve basıklık değerleri ise sırasıyla 0,18 nm, 0,23 nm, 2,04 nm, 0,08 ve 0,37’dir.

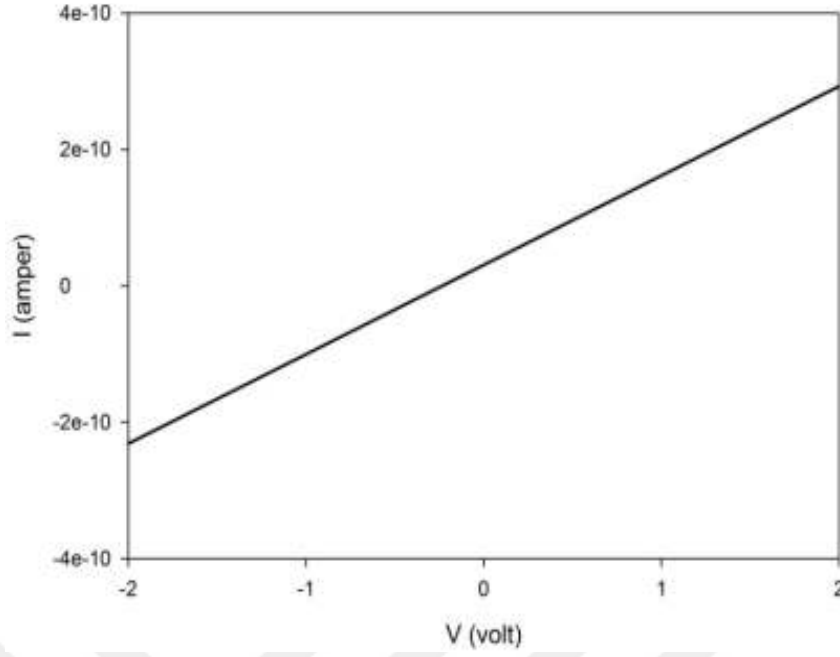
6.7. İki Uç Tekniği ve Hall Etkisi Ölçümü Sonuçları

Üretilen filmlerin iki uç tekniği ile elde edilen I-V grafikleri Şekil 6.50 ile Şekil 6.56 arasında gösterilmektedir. Ayrıca, filmlerin Hall etkisi ölçümü yapılarak belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonları ve mobiliteleri de verilmektedir.



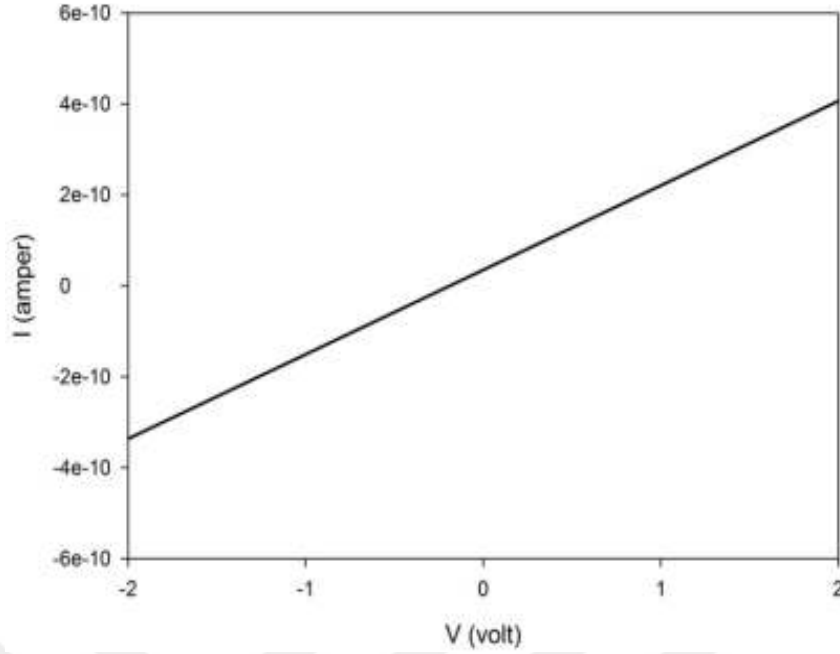
Şekil 6.50. Üretilen GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.50’de üretilen GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontağın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Şekilde gösterilen doğrunun eğimi $1,66 \times 10^{-9} \text{ A/V}$, eğimin tersinden bulunan direnç ise $0,60 \text{ G}\Omega$ ’dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $3,00 \times 10^3 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $3,33 \times 10^{-4} (\text{ }\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $8,03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $6,37 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu literatür ile uyumlu olup mobilite değeri literatürde rapor edilen değerden daha düşüktür (Ahrenkiel vd., 1987).



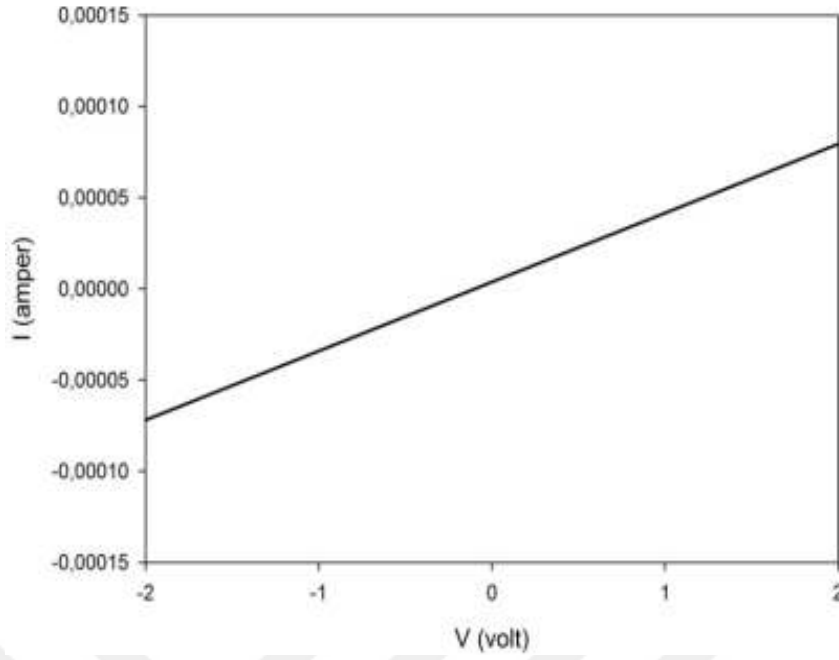
Şekil 6.51. Üretilen Co katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.51’de üretilen Co katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $1,31 \times 10^{-10}$ A/V, eğimin tersinden bulunan direnç ise $7,63 \text{ G}\Omega$ ’dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $3,05 \times 10^3 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $3,28 \times 10^{-4} (\text{}\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $4,79 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $6,21 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değeri literatürde rapor edilen değerden daha düşüktür (Wasik vd., 1986).



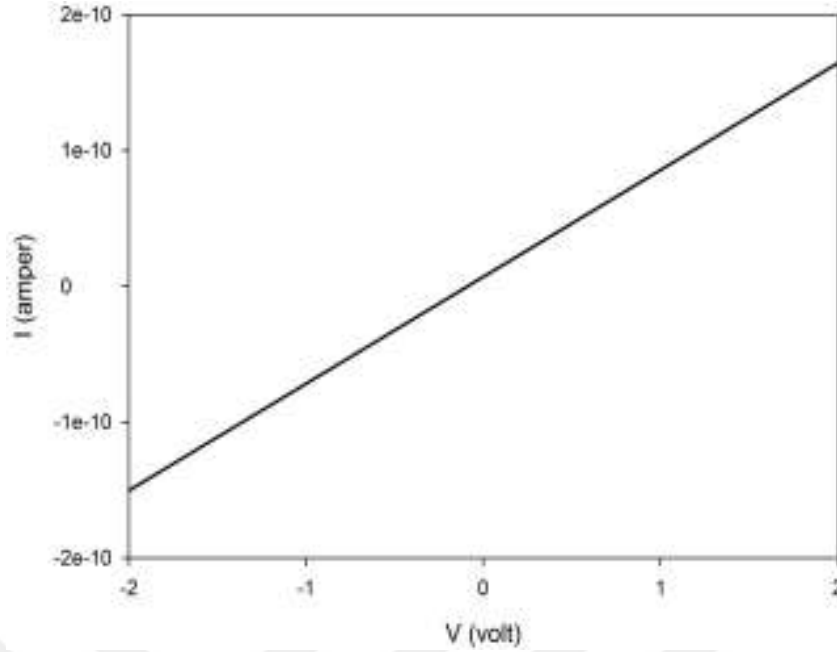
Şekil 6.52. Üretilen Al katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.52’de üretilen Al katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $1,85 \times 10^{-10}$ A/V, eğimin tersinden bulunan direnç ise $5,38 \text{ G}\Omega$ ’dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $4,85 \times 10^4 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $2,06 \times 10^{-5} (\text{ }\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $1,49 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $1,48 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değeri literatür ile uyumludur (Stringfellow, 1979).



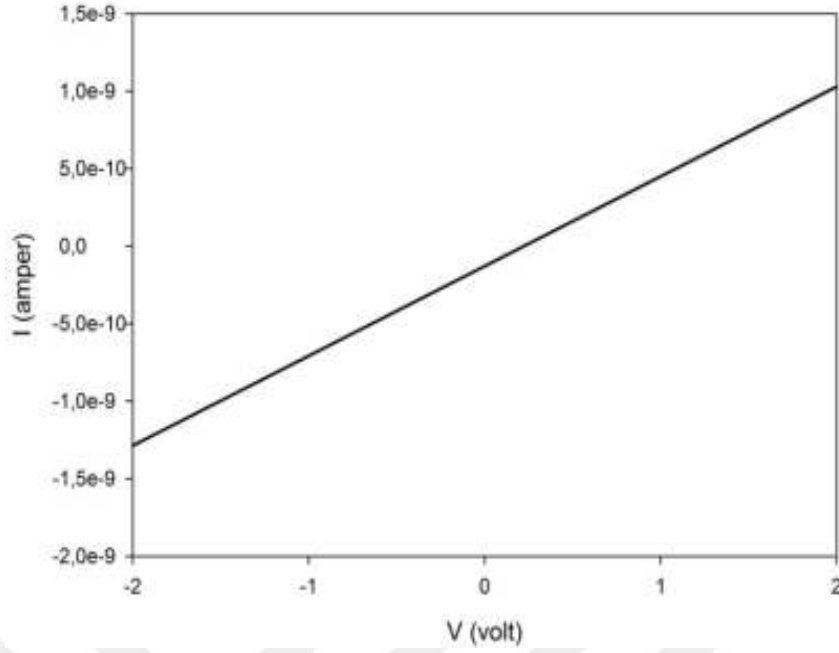
Şekil 6.53. Üretilen In katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.53'te üretilen In katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $3,78 \times 10^{-5}$ A/V, eğimin tersinden bulunan direnç ise $26,43 \text{ k}\Omega$ 'dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $1,32 \times 10^{-1} \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $7,57 (\text{ }\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $1,09 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $1,47 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değeri literatür ile uyumludur (Lee ve Fonstad, 1986; Tell vd., 1986).



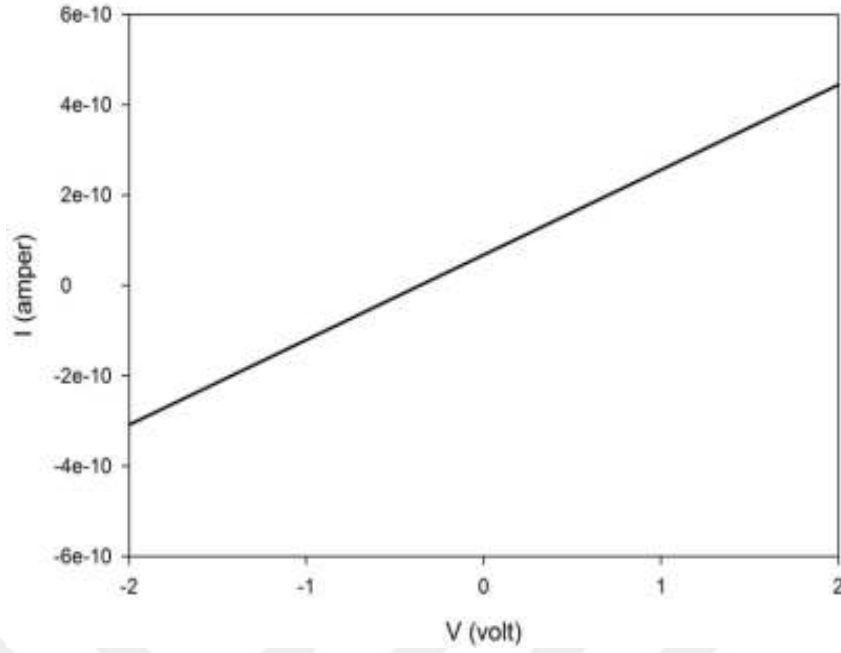
Şekil 6.54. Üretilen C katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.54'te üretilen C katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $7,86 \times 10^{-11}$ A/V, eğimin tersinden bulunan direnç ise $12,71 \text{ G}\Omega$ 'dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $1,02 \times 10^4 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $9,83 \times 10^{-5} (\text{ }\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $1,14 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $9,38 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu literatür ile uyumlu olup mobilite değeri literatürde rapor edilen değerden daha yüksektir (Ploog vd., 1981).



Şekil 6.55. Üretilen Si katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.55'te üretilen Si katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontağın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $5,79 \times 10^{-10}$ A/V, eğimin tersinden bulunan direnç ise $1,72 \text{ G}\Omega$ 'dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $1,38 \times 10^3 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $7,24 \times 10^{-4} (\text{}\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $1,58 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $6,37 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'tir. Belirlenen oda sıcaklığındaki taşıyıcı konsantrasyonu literatür ile uyumlu olup mobilite değeri literatürde rapor edilen değerden daha yüksektir (Chai vd., 1981; Ploog vd., 1981).



Şekil 6.56. Üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği.

Şekil 6.56’da üretilen Ge katkılı GaAs ince filmin akım-voltaj grafiği verilmektedir. Bu şekilde, akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmektedir. Buna göre incelenen film ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Ayrıca grafiğin eğimi $1,88 \times 10^{-10} \text{ A/V}$, eğimin tersinden bulunan direnç ise $5,31 \text{ G}\Omega$ ’dur. Bununla birlikte filmin öz direnci $9,03 \times 10^3 \text{ }\Omega\text{cm}$, iletkenliği ise $1,11 \times 10^{-4} (\text{}\Omega\text{cm})^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Hall etkisi ölçümü sonuçlarına göre ise taşıyıcı konsantrasyonu $1,04 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, mobilitesi ise $1,07 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ’tir. Belirlenen öz direnç literatürde rapor edilen değerden daha düşüktür (Rosztoczy, 1970). Bununla birlikte, taşıyıcı konsantrasyonu literatür ile uyumlu olup mobilite değeri literatürde rapor edilen değerden daha yüksektir (Rosztoczy, 1970; Ploog vd., 1981). Çizelge 6.1’de bu bölümde rapor edilen sonuçlar özetlenmektedir.

Çizelge 6.1. Üretilen filmlerin bazı fiziksel özellikleri.

Numune	D (nm)	δ (m^{-2})	t (nm)	Birikme hızı (nm/s)	n ($\lambda=632,8$ nm'de)	E _g (eV)	İletim tipi	R _a (nm)	R _q (nm)	AH (nm)	Ssk	Skr	n (cm^{-3})	ρ (Ωcm)	σ (Ωcm) ⁻¹	μ (cm^2/Vs)
GaAs	34	$8,65 \times 10^{14}$	1000	8,33	3,62	1,34	n	58,80	70,50	160,80	0,70	0,45	$8,03 \times 10^{17}$	$3,00 \times 10^3$	$3,33 \times 10^{-4}$	$6,37 \times 10^2$
GaAs:Co	29	$1,18 \times 10^{15}$	80	1,33	3,60	1,42	n	2,13	2,72	9,18	0,61	1,34	$4,79 \times 10^{17}$	$3,05 \times 10^3$	$3,28 \times 10^{-4}$	$6,21 \times 10^2$
GaAs:Al	30	$1,11 \times 10^{15}$	1800	9,47	3,30	1,62	p	76,60	93,60	262,40	0,53	0,18	$1,49 \times 10^{15}$	$4,85 \times 10^4$	$2,06 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^3$
GaAs:In	30	$1,11 \times 10^{15}$	1000	13,33	3,76	0,96	n	45,10	58,10	99,71	2,42	7,56	$1,09 \times 10^{16}$	$1,32 \times 10^{-1}$	$7,57 \times 10^0$	$1,47 \times 10^6$
GaAs:C	30	$1,11 \times 10^{15}$	160	4,00	3,81	1,50	n	1,04	1,29	6,92	0,04	0,26	$1,14 \times 10^{16}$	$1,02 \times 10^4$	$9,83 \times 10^{-5}$	$9,38 \times 10^3$
GaAs:Si	25	$1,60 \times 10^{15}$	160	3,20	3,85	1,25	n	14,50	18,00	48,32	0,85	0,71	$1,58 \times 10^{16}$	$1,38 \times 10^3$	$7,24 \times 10^{-4}$	$6,37 \times 10^5$
GaAs:Ge	30	$1,11 \times 10^{15}$	340	1,88	3,80	1,45	p	0,18	0,23	2,04	0,08	0,37	$1,04 \times 10^{16}$	$9,03 \times 10^3$	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^4$

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada katkısız GaAs ile Co, Al, In, C, Si ve Ge safsızlıkları katkılanmış GaAs ince filmler cam alttaşlar üzerine tek katmanlı olarak termiyonik vakum ark tekniği ile ilk kez biriktirilmiştir. Üretilen ince filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel, bileşimsel ve elektriksel özellikleri X-ışını difraktometresi, spektroskopik reflektometre, UV/VIS/NIR spektrofotometre, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımı spektrometresi, atomik kuvvet mikroskobu, akım gerilim kaynağı ve Hall etkisi ölçüm sistemi gibi cihazlar kullanılarak incelenmiştir.

XRD sonuçları, üretilen filmlerin tümünün polikristal yapıda olduğunu ve kristal boyutlarının 25 ile 34 nm arasında değiştiğini göstermiştir. Filmlerin ortalama kristal boyutları belirlenirken yapılanma katsayısı en büyük olan pik esas alınmıştır. En küçük tane boyutuna (25 nm) Si katkılı filmde rastlanmış olup en büyük tane boyutu (34 nm) ise katkılanmamış GaAs film için söz konusudur. Yapıdaki çizgisel kusurların miktarını gösteren dislokasyon yoğunluğunun (δ) diğer filmlere kıyasla daha yüksek olması Si katkılanmış filmin nispeten daha düşük kristalleşme seviyelerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Piklerin pozisyonlarındaki kaymaları gösteren makro gerilme değerlerinin oldukça küçük olması filmlerin kristal yapılarındaki deformasyonun oldukça az olduğunu bir göstergesidir.

Bu çalışmada incelenen filmler, biriktirme işlemleri sırasında herhangi bir kalınlık kontrolü uygulanmadan anot potasına konulan materyaller tükeninceye kadar sürdürülen deneyler sonucunda elde edilmiştir. Biriktirme süreleri 40 ile 190 s arasında değişmekte olup elde edilen spektroskopik yansıma ölçümü sonuçlarına göre film kalınlıkları 80 ile 1800 nm arasındadır. Filmlerin birikme hızları ise 1,33 ile 13,33 nm/s arasında değişmektedir. En düşük birikme hızına (1,33 nm/s) Co katkılı film sahipken en yüksek birikme hızı (13,33 nm/s) In katkılanmış film için söz konusudur. Verilen birikme hızları diğer ince film biriktirme tekniklerine kıyasla yüksek olup bu durum termiyonik vakum ark'ın oldukça hızlı ve seri üretim için uygun bir teknik olduğunu ortaya koymaktadır. Yansıma değerleri incelendiğinde filmlerin kısa dalgaboylarında düşük yansımaya sahip oldukları ve uzun dalgaboylarına gidildikçe yani düşük foton enerjilerinde yansımanın arttığı gözlenmiştir. Yaklaşık 800 nm dalga boyundan sonra filmlerin daha kuvvetli bir

yansıtıcı özellik gösterdiği söylenebilir. Bu durum, elektronlarla etkileşime girebilecek yeterli enerjiye sahip olmayan fotonların yansımaya uğrama ihtimallerinin yüksek olacağı şeklinde yorumlanabilir. Yine spektroskopik yansıma ölçümü sonuçlarına göre üretilen filmlerin kırılma indislerinin artan dalgaboyu ile birlikte azaldığı (normal dağılım gösterdiği) ve 632,8 nm dalgaboyunda 3,30 ile 3,85 arasında değiştiği bulunmuştur. Katkısız GaAs filmin 632,8 nm dalgaboyundaki kırılma indisi 3,62 olup Co ve Al katkılamanın kırılma indisini azalttığı, In, C, Si ve Ge katkılamanın ise kırılma indisini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kırıcılık özelliği yüksek olan filmlerin aynı zamanda yüksek yansıtma özelliğine de sahip oldukları bulunmuştur. Bir malzemenin sönüm katsayısı direkt olarak malzemenin soğurma karakteristiğine bağlıdır. Bu yüzden elde edilen tüm filmler uzun dalgaboşlarında daha yüksek geçirgen olup düşük soğurma ve düşük sönüm katsayısı değerlerine sahiptir. Bu sonuçları filmlere ait geçirgenlik ve soğurma spektrumları da desteklemektedir. Film kalınlığıyla geçirgenliğin azalması da kalınlığa bağlı soğurmada kaynaklanmaktadır. Üretilen Ge katkılı GaAs ince film, 300-700 nm dalgaboyu aralığında geçirgenliğe sahip olmadığı ve 700 nm'den daha büyük dalgaboşları için ise geçirgen olarak davrandığı için optik filtre üretiminde kullanılabilir.

Üretilen ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri katkılama ile büyük ölçüde değişmektedir. $(ahv)^2$ 'nin foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre değişim grafiklerinden tüm filmlerin doğrudan bant geçişli oldukları ve yasak enerji aralıklarının 0,96 ile 1,62 eV arasında değiştiği gözlenmiştir. Termiyonik vakum ark tekniği ile üretilen katkısız GaAs filmin yasak enerji aralığı 1,34 eV'dir. Bununla birlikte In ve Si katkılamanın yasak enerji aralığını azalttığı, Co, Al, C ve Ge katkılamanın ise yasak enerji aralığını arttırdığı bulunmuştur. En düşük yasak enerji aralığına (0,96 eV) In katkılı film sahipken en yüksek yasak enerji aralığına (1,62 eV) ise Al katkılı film sahiptir. Elde edilen bu yasak enerji aralığı değerleri literatürde yer alan çalışmalarda ki değerler ile uyum göstermektedir. İlaveten, sıcak uç metodu ile katkısız GaAs ve Co, In, C, Si katkılanmış GaAs filmlerin n-tipi yarıiletkenler olduğu belirlenmiştir. Yani bu filmlerin çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır. Al ve Ge katkılanmış GaAs filmlerin ise p-tipi olduğu anlaşılmıştır. Bu filmlerin çoğunluk yük taşıyıcıları ise hollerdir. Bu çalışmada üretilen tüm filmler güneş pili üretiminde kullanılabilir.

FESEM sonuçları, kullanılan cam alttaşların tamamen biriktirilen filmler ile kaplandığını göstermektedir. Ayrıca In katkılanmış film oluşumunun üç boyutlu Volmer-Weber büyüme mekanizması ile gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Bu filmin morfolojisinin aglomere bir yapı şeklinde ortaya çıkması tanelerin birbirleri arasındaki çekim kuvvetinin çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Si katkılanmış filmin FESEM görüntülerinde görülen mikro çatlakların oluşma sebebi ise filmin tercihlili büyüme yönlerinde çok düzlemli çekirdeklenme ve büyüme olmasıdır. Ayrıca, Ge katkılanmış film yüzeyinin diğer filmlere kıyasla çok daha düz ve pürüzsüz olduğu görülmüştür. Düz ve pürüzsüz bir yüzeyin elde edilmesi en küçük kararlı çekirdekçiklerin iki boyutta genişlemesi ile açıklanabilir. Buna göre film büyümesi düzlemsel tabakalar şeklinde gerçekleşmiştir. Bu tür film büyümesinde adatomların yüzeye olan adsorpsiyonları kendi aralarındaki adsorpsiyonlarından çok daha yüksektir. EDS sonuçları, buharlaştırılan malzemelerin filmlerdeki varlığını teyit etmiştir. Anot potasına koyulan malzemelerin kütleleri bileşim oranlarında etkili olmuştur. Kaynak malzemelerinin kütleleri film bileşimini ayarlamak için artırılıp azaltılabilir.

AFM sonuçları, katkısız GaAs ile Al ve In katkılanmış GaAs film yüzeylerinin yuvarlak tanelerden oluştuğunu göstermektedir. Co, C ve Si katkılanmış film yüzeyleri ise tabandan yukarıya doğru sivrilerek büyüyen tanelerden oluşmaktadır. Ayrıca, Al katkılanmış film yüzeyinde hem çukur bölgelerin hem de çok yüksek tepelerin yoğun olduğunu gözlemlenmiştir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün yüksek olmasına sebep olmuştur. Pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesi film oluşumunun Volmer-Weber mekanizması ile gerçekleştiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte özellikle In katkılanmış film yüzeyinin bazı bölgelerinde farklı yükseklik ve büyüklüklerde yığılmaların olduğu dikkat çekmektedir. Bunun, bazı küçük boyutlu tanelerin birbirleriyle birleşerek daha büyük boyutlu tanelere dönüşmesinden kaynaklandığı ve bu durum dikkate alındığında film oluşumunun ada tipi büyüme şeklinde gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca, Ge katkılanmış film yüzeyinin diğer filmlere kıyasla çok daha pürüzsüz olduğu görülmektedir. Bu gözlem, UV/VIS/NIR spektroskopi ve FESEM çalışmalarından elde edilen sonuçlarla da desteklenmektedir. Saçılma merkezleri olarak davranan tane sınırlarının azalması film üzerine gönderilen ışığın daha az saçılmasına ve bunun sonucu olarak geçirgenliğin artmasına neden olmuştur. Üretilen filmlerin kalınlıkları yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir parametredir. Film kalınlıkları arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı

görülmüştür. Pürüzlülüğün artması, yüzeyin yükseklik olarak homojen dağılım sergilemeyen tanelerden oluşmasından ve tabaka tabaka büyümenin baskın olmamasından kaynaklanmaktadır.

İki uç tekniği ile gerçekleştirilen akım-voltaj ölçümlerinin sonuçlarına göre, tüm filmler için akım değerinin uygulanan voltajla lineer olarak değiştiği görülmüştür. Buna göre filmler ile altın uç arasındaki kontakın omik bir kontak olduğu söylenebilir. Üretilen filmlerin öz dirençleri $1,32 \times 10^{-1}$ ile $4,85 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ arasındadır. In katkılı film en düşük öz dirence ($1,32 \times 10^{-1} \Omega\text{cm}$) sahipken Al katkılı film ise en yüksek öz dirence ($4,85 \times 10^4 \Omega\text{cm}$) sahiptir. Bir başka deyişle Al katkılı film en düşük iletkenliğe ($2,06 \times 10^{-5} (\Omega\text{cm})^{-1}$) sahipken In katkılı film ise en yüksek iletkenliğe ($7,57 (\Omega\text{cm})^{-1}$) sahiptir. Hall ölçümü sonuçlarına göre ise filmlerin taşıyıcı yoğunlukları $1,49 \times 10^{15}$ ile $8,03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ arasında olup mobiliteleri ise $6,21 \times 10^2$ ile $1,47 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arasındadır. En düşük taşıyıcı yoğunluğuna Al katkılı film sahipken en büyük taşıyıcı yoğunluğuna katkısız GaAs film sahiptir. Co katkılı filmin taşıyıcı mobilitesi ($6,21 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) en düşük iken In katkılı filmin taşıyıcı mobilitelerinin ($1,47 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) en yüksek olduğu bulunmuştur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abderrafi, K., Jiménez, E., Ben, T., Molina, S. I., Ibáñez, R., Chirvony, V., Martínez-Pastor, J. P., 2012, Production of nanometer-size GaAs nanocrystals by nanosecond laser ablation in liquid, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 12, 8, 6774-6778.
- Abdullah, R. A., Adem, K. A. ve Razooqi, M. A., 2008, The optical properties of GaAs thin films prepared by flash evaporation technique, *Tikrit Journal of Pure Science*, 13, 138-140.
- Ahrenkiel, R. K., Dunlavy, D. J., Greenberg, D., Schlupmann, J., Hamaker, H. C., & MacMillan, H. F. (1987). Electron mobility in p-GaAs by time of flight. *Applied physics letters*, 51(10), 776-778.
- Ajadi, D. A., Agboola, S. M., Adedokun, O., 2016, Effect of Spin Coating Speed on Some Optical Properties of ZnO Thin Films, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4, 05, 1.
- Al-Ani, S. K. J., AL-Ramadin, Y., Ahmad, M. S., Zihlif, A. M., Volpe, M., Malneonico, M., Martuscelli, E., Ragosta, G., 1999, The optical properties polymethylmethacrylate polymer dispersed liquid crystals, *Polimer Testing*, 18, 611-619.
- Arnell, R. D., Kelly, P. J., 1999, Recent advances in magnetron sputtering, *Surface and Coatings Technology*, 112, 170-176.
- Ashcroft, N. W., Mermin, N. M., 1976, *Solid State Physics*, Int.Ed., Saunders College Publishing, 826 s.
- Askeland, D. R., 1998, *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, (Çev. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım, 712 s.
- ASM Handbook, 1992, Volume 13- Corrosion, ASM International-USA, CVD/PVD Coatings, 456-457.
- Atomik Kuvvet Mikroskobu, <http://nanoturkiye.blogspot.com/2008/04/nano-101-atomik-kuvvet-mikroskopu.html> erişim tarihi 18.05.2016.
- Aybek, A. S., Kul, M., Turan, E., Zor, M., Gedik, E., 2008, Thermally stimulated currents in CdS film produced by ultrasonic spray pyrolysis method, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20, 5, 055216.
- Azevedo, G. de M., Da Silva, J. D., Avendano, E., 2005, Effect of hydrogenation on the optical and structural properties of GaAs thin films prepared by rf-magnetron sputtering, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 238, 1, 329-333.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Balbağ, M. Z., Pat, S., Cenik, M. I., Akan, T., Ekem, N., Musa, G., 2007, Boron evaporation and related difficulties. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 9, 4, 858-861.
- Balbağ, M. Z., 2009, Termiyonik vakum ark (TVA) tekniği ile magnezyum, bor ve magnezyum borür ince filmlerinin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Dotoru tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122 s. (yayımlanmamış).
- Balbağ, M. Z., Pat, S., Özkan, M., Ekem, N., Musa, G., 2010, Thermionic vacuum arc (TVA) technique for magnesium thin film deposition, *Physica B: Condensed Matter*, 405, 16, 3276-3278.
- Balbağ, M. Z., Pat, S., 2011, Electrically conductive and optically transparent polyethylene terephthalate films coated with gold and silver by thermionic vacuum arc. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, <http://jpf.sagepub.com/content/early/2011/06/06/8756087911406702.short> erişim tarihi: 20.06.2016.
- Baranowski, J. M., Grynberg, M., ve Magerramov, E. M., 1972, The optical properties of GaAs: Co, *Physica Status Solidi (b)*, 50, 2, 433-437.
- Benramdane, N., Murad, W. A., Misho, R. H., Ziane, M., Kebbab, Z., 2003, A chemical method for the preparation of thin films of CdO and ZnO, *Materials Chemistry and Physics*, 48, 119-123.
- Boxman, R.L., Sanders, D.M., Martin, P.J. ve Lafferty, J.M., 1995, *Handbook of vacuum arc science and technology*, Noyes Publications, New Jersey, USA.
- Brandon, D., ve Kaplan, W. D., 2013, *Microstructural characterization of materials*, John Wiley & Sons.
- Bravais örgüleri, http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_03_4-en.html erişim tarihi 18.05.2016.
- Bunshah, R. F., 1994, *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings, Science, Technology and Applications*, Noyes Publications, 861 s.
- Bunshah, R. F., 2001, *Handbook of hard coatings*, Noyes Publication, United States.
- Caferov, T., 1998, *Yarıiletken Fiziği-1*, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, 200s.
- Callister, W. D., 2004, *Fundamentals of Materials Science & Engineering*, John Wiley & Sons, 824.s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cansever, N., 2001, Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/8b3eff8baf56627_ek.pdf?dergi=29, erişim tarihi: 15.02.2016.
- Chen, C.-W., Wu, M.-C., Lu, S.-C., Chang, C.-C., 1993, Photoluminescence Study of heavily Te-doped GaAs grown by liquid-phase epitaxy, Japanese journal of applied physics, 32, 6R, 2725.
- Chen, M., Zhu, Y., Chen, A., Shen, Z., Tang, Z., 2016, Optical investigations of Be doped ZnO films grown by molecular beam epitaxy, Materials Research Bulletin, 78, 16-19.
- Cho, S., Kim, E. K. ve Min, S. K., 1998, Photoluminescence in carbon-doped GaAs grown by atmospheric-pressure metalorganic chemical vapor deposition, Journal of the Korean Physical Society, 32, 4, 584-587.
- Chai, Y. G., Chow, R., ve Wood, C. E. C., 1981, The effect of growth conditions on Si incorporation in molecular beam epitaxial GaAs. Applied Physics Letters, 39, 10, 800-803.
- Choi, H. Y., Cho, M. Y., Yim, K. G., Kim, M. S., Lee, D.-Y., Kim, J. S., ... Leem, J.-Y., 2012, Growth and optical characteristics of Mg-doped GaAs epitaxial layers by molecular beam epitaxy, Microelectronic Engineering, 89, 6-9.
- Cullity, B., D., 1966, X-Işınlarının difraksiyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çetin, N. E., Korkmaz, Ş., Elmas, S., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, M. Z., ... Özmumcu, M., 2013, The structural, optical and morphological properties of CaF₂ thin films by using thermionic vacuum arc (TVA), Materials Letters, 91, 175-178.
- Dikici, M., 1993, Katıhal Fiziğine Giriş, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları, 276 s.
- Dikici, M., 2012, Katıhal Fiziği. Seçkin Yayıncılık, 424 s.
- Durlu, T. N., 1996, Katıhal Fiziğine Giriş, Bilim Yayınları, 311 s.
- Ehrich, H., Schuhmann, J., Musa, G., Popescu, A., ve Mustata, I., 1998, Adhesive metal films obtained by thermionic vacuum arc (TVA) deposition, Thin Solid Films, 333, 1, 95-102.
- Ekem N., Musa G., Pat S., Balbağ M. Z., Cenik I., Vladoru R., 2008, Carbon thin film deposition by thermionic vacuum arc (TVA), Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, 10, 3, 672-674.
- El-Zahed, H., 2001, The effect of γ -doses on the optical band gap of AgInSe₂ films, Journal of Physics and Chemistry of Solid., 62, 641-646.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Evcin, A., 2006, Kaplama Teknikleri Ders Notları, <http://www.kimmuh.com/evcin/coating/coating8.pdf>, erişim tarihi: 05.04.2016.
- Filmetrics, 2014, <http://www.filmetrics.com/refractive-index-database/GaAs/Gallium-Arsenide>, erişim tarihi: 08.04.2016.
- Filmetrics F20 Kullanma Klavuzu, <http://www.nanofab.ubc.ca/files/2014/04/F20-Manual.pdf>, erişim tarihi: 10.05.2016.
- Fox, M., 2001, Optical Properties of Solids, Oxford Master Series in Condensed Matter Physics, Oxford University Press, 305 s.
- Gal, D., Hodes, G., Lincot, D. ve Schock, H. W., 2000, Electrochemical deposition of zinc oxide films from non-aqueous solution: a new buffer/window process for thin film solar cells, Thin Solid Films, 361, 79-83.
- George, J., 1992, Preparation of Thin Films, Marcel Dekker, 374 s.
- Gezici, S., 1992, Katıhal Fiziği, İstanbul Üniversitesi Yayınları, s.3-18.
- Glocker, David A. ve Shah S. I., 1995, Handbook of thin film process technology, Institute of Physics Publishing, Bristol.
- Heiss, M., Conesa-Boj, S., Ren, J., Tseng, H.-H., Gali, A., Rudolph, A., ... others, 2011, Direct correlation of crystal structure and optical properties in wurtzite/zinc-blende GaAs nanowire heterostructures, Physical Review B, 83, 4, 45303.
- Hernandez, J. G., Gorley, P. M., Horles, P. P., Vartsabyuk, O. M., Vorobiev, Y. V., 2002, X-Ray kinetic and optical properties of thin CuInS₂ films, Thin Solid Films, 403, 471-475.
- Holmberg, K. ve Matthews, A., 1994, Coatings tribology: a concept, critical aspects and future directions, Thin Solid Films, 253, 1-2, 173-178.
- Hook, J. R. ve Hall, H. E., 1999, Katıhal Fiziği, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Ilıcan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M., Kundakçı, M., Ateş, A., 2009, Photovoltaic solar cell properties of Cd_xZn_{1-x}O films prepared by sol-gel method, International journal of hydrogen energy, 34, 12, 5201-5207.
- Joseph, B., Gopchandran, K. G., Thomas, P. V., Koshy, P. ve Vaidyan, V. K., 1999, A study on the chemical spray deposition of zinc oxide thin films and their structural and electrical properties, Materials Chemistry and Physics, 58, 71-77.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kageyama, T., Kiyota, K., Shimizu, H., Kawakita, Y., Iwai, N., Takaki, K., ... Kasukawa, A., 2009, Optical absorption coefficient of carbon-doped GaAs epitaxial layer by means of propagation-loss measurement of waveguide for long wavelength VCSEL, IEEE International Conference on Indium Phosphide & Related Materials, 351-354.
- Keleşoğlu, E., 2011, Sert Kaplamalar, <http://www.yildiz.edu.tr/~ergunk/SertKaplamalarErgunKelesoglu.pdf> erişim tarihi: 10.04.2016.
- Kelly, P. J., Arnell, R. D., 2000, Magnetron Sputtering: A Review of Recent Developments and Applications, Vacuum, 56, 159-172.
- Kittel, C., 1996, Katılmal Fiziğine Giriş, Güven Kitap Yayın Dağıtım, s. 430-434.
- Korkmaz, Ş., Elmas, S., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, M. Z., 2012a, Deposition of MgF₂ thin films for antireflection coating by using thermionic vacuum arc (TVA), Optics Communications, 285, 9, 2373-2376.
- Korkmaz, Ş., Pat, S., Ekem, N., Balbağ, M. Z., Temel, S., 2012b, Thermal treatment effect on the optical properties of ZrO₂ thin films deposited by thermionic vacuum arc, Vacuum, 86, 12, 1930-1933.
- Korkmaz, Ş., Geçici, B., Korkmaz, S. D., Mohammadigharehbagh, R., Pat, S., Özen, S., Şenay, V., Yudar, H. H., 2016, Morphology, composition, structure and optical properties of CuO/Cu₂O thin films prepared by RF sputtering method, Vacuum, 131, 142-146.
- Kressel, H., Dunse, J. U., Nelson, H., Hawrylo, F. Z., 1968, Luminescence in Silicon-Doped GaAs Grown by Liquid-Phase Epitaxy. Journal of Applied Physics, 39, 4, 2006-2011.
- Kul, M., Aybek, A. S., Turan, E., Zor, M., Irmak, S., 2007, Effects of fluorine doping on the structural properties of the CdO films deposited by ultrasonic spray pyrolysis, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91, 20, 1927-1933.
- Kundakçı, M., 2011, The annealing effect on structural, optical and photoelectrical properties of CuInS₂/In₂S₃ films, Physica B: Condensed Matter, 406, 15, 2953-2961.
- Lee, W. ve Fonstad, C. G., 1986, The growth of high mobility InGaAs and InAlAs layers by molecular beam epitaxy, Journal of Vacuum Science & Technology B, 4, 2, 536-538.
- Lindfords, P. A., Mularie, W. M. ve Wehner, G. K., 1986, Cathodic arc deposition technology, Surface and Coatings Technology, 29, 275-290.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liu, C. H., Lin, T. K., Chang, S.-J., Su, Y.-K., Chiou, Y. Z., Wang, C. K., ... Huang, B. R., 2006, Photo-assisted thermally oxidized GaAs insulator layers deposited by photo-CVD, *Surface and Coatings Technology*, 200, 10, 3250-3253.
- Lubianiker, Y., Baberg, I., 1997, Observation of a meyer-neldel rule for hopping conductivity. *Phys. Stat. Sol(b)*, 205, 199-124.
- Lungu, C. P., Mustata, I., Musa, G., Zaroschi, V., Lungu, A. M., Iwasaki, K., 2004, Low friction silver-DLC coatings prepared by thermionic vacuum arc method, *Vacuum*, 76, 2, 127-130.
- Lungu, C. P., Mustata, I., Lungu, A. M., Zaroschia, V., Musaa, G., Iwanagab, I., ... others, 2005, Influence of Re on the thermo-electron emission from thoriated W cathode during Re deposition by thermionic vacuum arc (TVA) method, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7, 5, 2513-2519.
- Lungu, C. P., Mustata, I., Musa, G., Lungu, A. M., Brinza, O., Moldovan, C., ... others, 2006, Unstressed carbon-metal films deposited by thermionic vacuum arc method, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8, 1, 74.
- Maaßdorf, A., Gramlich, S., Richter, E., Brunner, F., Weyers, M., Tr€ankle, G., 2002, Minority-carrier kinetics in heavily doped GaAs: C studied by transient photoluminescence, *Journal of Applied Physics* 91, 8, 5072-5078.
- Mathematical Foundations of Monte Carlo Methods, <http://www.scratchapixel.com/lessons/mathematics-physics-for-computer-graphics/monte-carlo-methods-mathematical-foundations/probability-distribution-part2> erişim tarihi: 15.04.2016.
- Mattox, D. M., 1998, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control*, Noyes Publication, 917 s.
- Mckelvey, J. P., 1966, *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper and Row Publishers, 344.s.
- Metzger, W. K., Wanlass, M. W., Ellingson, R. J., Ahrenkiel, R. K., Carapella, J. J., 2001, Auger recombination in low-band-gap n-type InGaAs, *Applied Physics Letters*, 79, 20, 3272-3274.
- Mizuguchi, K., Hayafuji, N., Ochi, S., Murotani, T., Fujikawa, K., 1986, MOCVD GaAs growth on Ge (100) and Si (100) substrates, *Journal of Crystal Growth*, 77, 1, 509-514.
- Mott, N. F., Davis, E. A., 1979, *Electronic Process in Noncrystalline Materials*. Clarendon Press, s. 273-274.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A., Popescu, A., 1983, Low voltage arc welding in vacuum, *Review Roum. Physics*, 28, 907.
- Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A., Popescu, A., 1984, Heated cathode arc in vacuum developed in the vapors of the heated anode, *Proc. X1th Int. Symp. On Discharges And Insulation In Vacuum*, 229.
- Musa, G., Ehrich, H., ve Mausbach, M., 1994, Studies on thermionic cathode anodic vacuum arcs, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 12, 5, 2887-2895.
- Musa, G. S., Ehrich, H., ve Schuhmann, J., 1997, Pure metal vapor plasma source with controlled energy of ions, *IEEE transactions on plasma science*, 25, 2, 386-391.
- Musa, G., Mustata, I., Ciupina, V., Vladoiu, R., Prodan, G., Vasile, E., Ehrich, H., 2004, Diamond-like nanostructured carbon film deposition using thermionic vacuum arc, *Diamond and Related Materials*, 13, 4, 1398-140.
- Musa, G., Mustata, I., Blideran, M., Ciupina, V., Vladoiu, R., Prodan, G., ... Ehrich, H., 2005, Thermionic vacuum arc-new technique for high purity carbon thin film deposition, *Acta Physica Slovaca*, 55, 4, 417-421.
- Musa, G., Mustata, I., Blideran, M., Ciupina, V., Vladoiu, R., Prodan, G. ve Vasile, E., 2003, Nanostructured carbon thin films deposition using Thermionic Vacuum Arc (TVA) technology. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 5, 3, 667-674.
- Musa, G., Bob, C. S., Lungu, C. P., Ciupina, V., Vladoiu, R., 2007, Gaseous Thermionic Vacuum Arc (G-TVA)-an extension of TVA (Thermionic Vacuum Arc) input materials from solid samples to gases and liquids for carbon thin film deposition, *Journal of optoelectronics and advanced materials*, 9, 4, 867.
- Musil, J., 1998, Low-Pressure Magnetron Sputtering, *Vacuum*, 50, 363-372.
- Nag, B. R., 1980, *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Springer-Verlag.
- Natsume, Y., Sakata, H., 2000, Zinc oxide films prepared by Sol-gel spin coating. *Thin Solid Films*, 372, 30-36.
- Nelson, J., 2003, *The physics of solar cells*, Imperial College Press, 1, 16, 200-202.
- Ohring, M., 2002, *Materials Science of Thin Films*, Academic Press, 794 s.
- Omar, M. A., 1975, *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, 669 s.
- Orton, J., 2004, *The Story of Semiconductors*, Oxford University Press Inc., 510 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Oura, K., Lifshits, V. G., Saranin, A. A., Zotov, A. V., Katayama, M., 2003, Surface Science, Springer, 168 s.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015a, Characterization of a fast grown GaAs: Sn thin film by thermionic vacuum arc, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26, 11, 8983-8987.
- Özen, S., Pat, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., Geçici, B., 2015b, Some physical properties of the SiGe thin film coatings by thermionic vacuum arc (TVA), Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 10, 1, 56-60.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015c, Deposition of a Mo doped GaN thin film on glass substrate by thermionic vacuum arc (TVA), Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26, 7, 5060-5064.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015d, Investigation on the morphology and surface free energy of the AlGaIn thin film, Journal of Alloys and Compounds, 653, 162-167.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015e, The influence of voltage applied between the electrodes on optical and morphological properties of the InGaIn thin films grown by thermionic vacuum arc, Scanning, 38,1, 14-20.
- Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015f, AlGaAs film growth using thermionic vacuum arc (TVA) and determination of its physical properties, The European Physical Journal Plus, 130, 6, 1-6.
- Özkan, M., Ekem, N., Balbağ, M. Z., Pat, S., 2012a, ZnSe nanocrystalline thin films deposition on Si substrate by thermionic vacuum arc, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, <http://pil.sagepub.com/content/early/2012/01/10/1464420711433095.abstract>, erişim tarihi: 21.06.2016.
- Özkan, M., Ekem, N., Pat, S., Balbağ, M. Z., 2012b, ZnS thin film deposition on silicon and glass substrates by thermionic vacuum arc, Materials Science in Semiconductor Processing, 15, 2, 113-119.
- Pankove I. J., 1971, Optical Processes in Semiconductors, Prentice-Hall, 422 s.
- Pat, S., Ekem N., Akan T., Kusmus O., Demirkol S., Vladoiu R., Lungu C.P., Musa G., 2005, Study on thermionic vacuum Arc-A novel and advanced technology for surface coating, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 7, 5, 2495-2499.
- Pat, S., 2007, Çoklu gaz karışımı plazmalarının optik emisyon spektroskopisi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 149 s. (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pat, Ş., Özmumcu, M., Ekem, N., Özkan, M., Korkmaz, Ş., Balbağ, M. Z., 2010, Antireflective coating on polyethylene terephthalate by thermionic vacuum arc, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 26, 3, 259-270.
- Pat, S., Temel, S., Ekem, N., Korkmaz, Ş., Özkan, M., Balbağ, M. Z., 2011, Diamond-like carbon coated on polyethylene terephthalate by thermionic vacuum arc, *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 27,1-2, 127-137.
- Pat, S., Balbağ, M. Z., Korkmaz, Ş., 2013, Ultra thin carbon films deposited on SrTiO_3 substrates by thermionic vacuum arc, *Nano*, 8, 3, 1350028.
- Pat, S., Balbağ, M. Z., Korkmaz, Ş., 2014a, Mechanical properties of deposited carbon thin films on sapphire substrates using atomic force microscopy (AFM), *Ceramics International*, 40, 7, 10159-10162.
- Pat, S., Çetin, N. E., Ekem, N., Balbag, M. Z., Korkmaz, Ş., 2014b, Characterization of AlF_3 thin films deposited by thermionic vacuum arc, *Materials Focus*, 3, 1, 72-74.
- Pat, S., Korkmaz, Ş., Balbağ, M. Z., 2014c, A new deposition technique using reactive thermionic vacuum arc for ZnO thin film production, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 9, 3, 437-441.
- Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., Şenay, V., 2015a, Direct and fast growth of GaAs thin films on glass and polyethylene terephthalate substrates using a thermionic vacuum arc, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26, 4, 2210-2214.
- Pat, S., Çetin, N. E., Korkmaz, Ş., Balbağ, M. Z., Ekem, N., 2015b, Characterization of BaF_2 thin film deposited by thermionic vacuum arc, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 10, 3, 301-303.
- Pat, S., Özen, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., Şimşek, V., 2015c, Optical and surface properties of the in doped GaAs layer deposition using thermionic vacuum arc method, *Scanning*, 38, 4, 297-302.
- Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., Şenay, V., 2016a, Heavily carbon doped GaAs nanocrystalline thin film deposited by thermionic vacuum arc method, *Journal of Alloys and Compounds*, 657, 711-716.
- Pat, S., Şenay, V., Özen, S., Korkmaz, Ş., 2016b, Surface, nanomechanical and optical properties of Mo-Doped GeGaAs thin film deposited by thermionic vacuum arc, *Journal of Electronic Materials*, 45, 1, 255-261.
- Pierret, R., F., 1989, *Semiconductor fundamentals*, Addison-Wesley Publishing, New York, p. 1-19.
- Piprek, J., 2003, *Semiconductor Optoelectronic Devices Introduction to Physics and Simulation*, Academic Press, 279 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ploog, K., Fischer, A., ve Künzel, H., 1981, The use of Si and Be impurities for novel periodic doping structures in GaAs grown by molecular beam epitaxy, *Journal of The Electrochemical Society*, 128, 2, 400-410.
- Raposo, M., Ferreira, Q., ve Ribeiro, P. A., 2007, A guide for atomic force microscopy analysis of soft-condensed matter, *Modern Research and Educational Topics in Microscopy*, 1, 758-769.
- Refractiveindex, 2016, <http://www.refractiveindex.info>, erişim tarihi: 25.08.2016.
- Reimer, L., 1985, *Scanning electron microscopy, physics of image formation and microanalysis*, Springer-Verlag, New York.
- Reyes, J. D., Arellano, M. G. ve Juarez, J. M., 2009, Structural characterization of carbon doped GaAs layers grown by mocvd, *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia Materiales*, S1, 2, 545-548.
- Rickerby, D. S., Matthews, A., 1991, *Advanced surface coatings: a handbook of surface engineering*, ekitap, <http://www.bcin.ca/Interface/openbcin.cgi?submit=submit&Chinkey=127805>, erişim tarihi: 12.03.2016.
- Rinzan, M. B. M., Perera, A. G. U., Matsik, S. G., Liu, H. C., Buchanan, M., Von Winckel, G., Stintz, A. ve Krishna, S., 2005, Terahertz absorption in AlGaAs films and detection using heterojunctions, *Infrared Physics & Technology*, 47, 188-194.
- Rosztoczy, F. E., Ermanis, F., Hayashi, I., ve Schwartz, B., 1970, Germanium-Doped Gallium Arsenide, *Journal of Applied Physics*, 41, 1, 264-270.
- Rudden, M. N. ve Wilson, J., 1980, *Elements of solid state physics*, Wiley.
- Rutkowska, K.A., Duchesne, D., Volatier, M., Ar`es, R., Aimez, V. ve Morandotti, R., 2011, Second Harmonic Generation in AlGaAs Nanowaveguides, *Acta Physica Polonica A*, 120, 4, 725, 731.
- Rudden, M. N., Wilson, J., 1980, *Elements of Solid State Physics*, School of Physics, Newcastle Upon Tyne Polytechnic , 186 s.
- Sanders, D. M., Anders A., 2000. Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new millennium, *Surface and Coatings Technology*, 133, 134, 78-90.
- Schade, H., Nelson, H., Kressel, H., 1971, Efficient photoemission from ge-doped gaas grown by liquid-phase epitaxy, *Applied Physics Letters*, 18, 4, 121-122.
- Schroder, D. K., 2006, *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley & Sons, New Jersey.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Seeger, K., 2002, Semiconductor physics: An introduction 8th Edition, Springer-Verlag, Berlin.
- Serin, N., 1990, Entegre devreler. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, 289 s.
- Seshan, K., 2002, Handbook of thin-film deposition processes and techniques principles, Methods, Equipment and Applications, Noyes Publication/William Andrew Publishing, 629 s.
- Sitarek, P., Misiewicz, J., Veje, E., 2000, Franz–Keldysh oscillations in photoreflectance spectra of complex $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ structures, Advanced Materials for Optics and Electronics, 10, 6, 261-265.
- Skauli, T., Kuo, P. S., Vodopyanov, K.L., Pinguet, T. J., Levi, O., Eyres, L. A., Harris, J. S., Fejer, M. M., Gerard, B., Becouarn, L. ve Lallier, E., 2003, Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics, J. Appl. Phys., 94, 6447-6455.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Nieman, T. A., 1998, Enstrümental Analiz İlkeleri, (Çev. E. Kılıç, F. Köseoğlu, H. Yılmaz), Bilim Yayınları.
- Smith, R. A., 1978, Semiconductors, Cambridge University Pres, Cambridge.
- Smith, W. F., 1990, Principles of materials science and engineering, McGraw-Hill, Inc., 864 s.
- Streetman, B. G., 1980, Solid state electronic devices, Prentice-Hall, 461 s.
- Stringfellow, G. B., 1979, Electron mobility in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Journal of Applied Physics, 50, 6, 4178-418.
- Surdu-Bob, C., Musa, G., Vladoiu, R., Lungu, C. P., 2007, The synthesis of DLC using a novel cathodic arc technique: Gas-TVA, Journal of optoelectronics and advanced materials, 9, 8, 2660-2662.
- Sze, S. M., 1981, Physics of semiconductor devices, A Wiley-Interscience Publication, s. 7-50.
- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Geçici, B., Korkmaz, Ş., 2015a, A new method for titania thin film production Thermionic vacuum arc method, Journal of Thermoplastic CompositeMaterials, <http://jtc.sagepub.com/content/early/2015/11/04/0892705715614060.abstract>, erişim tarihi: 18.05.2016.
- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015b, Optical, structural and morphological characterization of a Zn-Doped GaAs semiconducting thin film produced by thermionic vacuum arc, Materials Focus, 4, 6, 397-402.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015c, Some physical properties of a Si-doped nano-crystalline GaAs thin film grown by thermionic vacuum arc, Vacuum, 119, 228-232.
- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2016a, Optical, morphological and mechanical properties of an Al–Al₂O₃ nanocomposite thin film grown by thermionic vacuum arc, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 127, 6, 3383-3387.
- Şenay, V., Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2016b, Optical, structural, morphological and compositional characterization of a Co-doped GaAs semiconducting thin film produced by thermionic vacuum arc. Journal of Alloys and Compounds, 663, 829-833.
- Tarımcı C., Sarı H., 2006, Vakum tekniği, Seçkin Yayıncılık, 168 s.
- Taylor, J. R., Zafaritos, C. D., 1996, Fizik ve Mühendislikte Modern Fizik, (Çev. B. Karaoğlu) , Bilgi Tek Yayıncılık, 455 s.
- Tell, B., Brown-Goebeler, K. F., Bridges, T. J., ve Burkhardt, E. G., 1986, Resistance and mobility changes in InGaAs produced by light ion bombardment, Journal of Applied Physics, 60, 2, 665-667.
- Tracton, A. A., 2006, Coatings technology: fundamentals, testing and processing techniques, CRC Press, Boca Raton, USA.
- Turan, E., Kul, M., Aybek, A. S., Zor, M., 2009, Structural and optical properties of SnS semiconductor films produced by chemical bath deposition, Journal of Physics D: Applied Physics, 42, 24, 245408.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu <http://www.taek.gov.tr/radyasyon-sistemleri/674-vakum-nedir-basinc-aralıkları-nelerdir.html> algılama-erişim tarihi: 13.04.2016.
- Ullrich, B., Sakai, H., Dushkina, N.M., Ezumi, H., Keitoku, S., Kobayashi, T., 1998, The influence of the laser fluence on the transmission features of thin CdS films formed by laser ablation, Microelectronic Engineering, 43-44, 695-700.
- Van der Pauw, L. J., 1958, A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on Lamellae of arbitrary shape, Philips Technical Review, 20, 220-224.
- Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G., Morales-Acevedo, A. ve Contreras-Puente, G., 2000, Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films, Thin Solid Films, 361, 362, 53-55.
- Vladoiu, R., Musa, G., Mustata, I., 2003, Thermoionic vacuum arc- a new method of thin film deposition, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 5, 1, 325-330.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vladoiu, R., Ciupina, V., Lungu, C. P., Bursikova, V., Musa, G., 2006, Thermoionic vacuum arc (TVA) deposited tungsten thin film characterization. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8, 1, 71.
- Vladoiu, R., Ciupina, V., Surdu-Bob, C., Lungu, C. P., Janik, J., Skalny, J. D., ... Musa, G., 2007, Properties of the carbon thin films deposited by thermionic vacuum arc, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 9, 4, 862.
- Vossen, J. V., Kerner, W., 1991, *Thin Film Processes II*, Academic Press, 866 s.
- Vyskocil, J., Musil, J., 1990, Arc evaporation of hard coatings: Process and film properties, *Surface and Coating Technology*, 43, 44, 299-311.
- Wasa, K., Hayakawa, S., 1992, *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Noyes Publication, 304 s.
- Wasik, D., Baj, M., ve Hennel, A. M., 1986, Co 1+(3 d 8) double acceptor state in GaAs, *Physical Review B*, 34, 6, 4099.
- Williams, R., 1990, *Modern GaAs Processing Methods*, Artech House Publishers, s. 1-437.
- Williamson, G. K., Smallman, R. E., 1956, III. Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum, *Philosophical Magazine*, 1,1, 34-46.
- Wosko, M., Paszkiewicz, B., Tarnowski, K., 'Sciana, B., Radziewicz, D., Salejda, W., Paszkiewicz, R. ve Tlaczala, M., 2011, Reverse engineering of Al_xGa_{1-x}As/GaAs structures composition by reflectance spectroscopy *Opto-Electronics Review*, 19, 418.
- Xu, J. F., Thibado, P. M., Awo-Affouda, C., Moore, R., LaBella, V. P., 2007, Atmospheric oxygen in Mn doped GaAs/GaAs (001) thin films grown by molecular beam epitaxy, *J Cryst Growth*, 301, 54-57.
- Xue, S. W., Zu, X. T., Zhou, W. L., Deng, H. X., Xiang, X., Zhang, L., Deng, H., 2008, Effects of post-thermal annealing on the optical constants of ZnO thin film, *Journal of Alloys and Compounds*, 448, s. 21-26.
- Zegadi, C., Abderrahmane, A., Chaumont, D., Lacroute, Y., Abdelkebir, K., Hamzaoui, S. ve Adnane, M., 2016, Influence of iron doping on morphological, structural and optical properties of zinc oxide thin films prepared by dip-coating method, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 52, 4, 362-369.

ÖZGEÇMİŞ

1. GENEL

DÜZENLEME TARİHİ 20.10.2016
ÜNVANI ADI SOYADI Arş. Gör. Volkan ŞENAY
YAZIŞMA ADRESİ Bayburt Üniversitesi Dede Korkut Yerleşkesi Eğitim
Fakültesi İlköğretim Bölümü Fen Bilgisi Eğitimi Ana Bilim
Dalı Merkez/BAYBURT
DOĞUM YILI 1985
YABANCI DİL İngilizce
TELEFON +90 (458) 211 1176
E-POSTA vsenay@bayburt.edu.tr

2. EĞİTİM

MEZUNİYET TARİHİ	DERECE	ÜNİVERSİTE-FAKÜLTE- BÖLÜM/ANABİLİM DALI
	Doktora	ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
01.08.2012	Yüksek Lisans	ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
08.02.2010	Lisans	ESOGÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Doktora Tez Başlığı

Katkılı ve Katkısız GaAs İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi (Preparation of Doped and Undoped GaAs Thin Films and Investigation of Their Some Properties). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı. Eskişehir. Danışman: Doç. Dr. Suat PAT

Yüksek Lisans Tez Başlığı

Kuantum Kriptografi (Quantum Cryptography). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı. Eskişehir, Temmuz 2012. Danışman: Prof. M. Selami KILIÇKAYA

3. AKADEMİK VE MESLEKİ DENEYİM

KURUM/ KURULUŞ	ÜLKE	ŞEHİR	BÖLÜM/BİRİM	GÖREV	GÖREV DÖNEMİ
Bayburt Üniversitesi	Türkiye	Bayburt	Eğitim Fakültesi İlköğretim Bölümü Fen Bilgisi Eğitimi Ana Bilim Dalı	Arş. Gör.	29.07.2010- Halen

4. PROJE DENEYİMİ

III-V Grubu Yarıiletken Bileşiklerin Elektriksel Özellikleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 13.05.2016-13.05.2017 (Devam Ediyor), Eskişehir.

Yüksek Şeffaflığa Sahip Uzun Devir Ömür Özellikli Şarj Edilebilir Lityum Pil Geliştirilmesi ve Vakum ya da Çeşitli Gaz Atmosferlerinde Çalışabilecek Test İstasyonu Tasarımı. TÜBİTAK, 1005 Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı, Proje No: 115E331. Bursiyer, 01.10.2015-01.06.2017 (Devam Ediyor), Eskişehir.

Katkılı III-Nitrat Grubu Bileşiklerin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 20.02.2015-20.02.2016, Eskişehir.

Plazma Destekli Teknolojiler ile Üretilen İleri Teknoloji Malzemelerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 25.07.2014-25.01.2015, Eskişehir.

Ortaöğretim Öğrencileri için Maddenin Dördüncü Hali, Plazma ve Genel Özelliklerinin Açıklanması için Yeni Bir Deney Sistemi Tasarımı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 19.06.2014-19.06.2015 (Devam Ediyor), Eskişehir.

İkincil Tip Piller için Elektrolit ve Elektrot Üretimleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 06.12.2013-06.12.2014, Eskişehir.

Enerji Konusunda Öğrenme Kuşağı. TÜBİTAK, 4004 Bilim ve Doğa Kampı, Proje No: 113B051. Eğitmen, 30 Haziran-5 Temmuz 2013, Bayburt.

Genç Bilim İnsanları Yapararak, Yaşayarak ve Eğlenerek Bilime Dokunuyor. TÜBİTAK, 4004 Bilim ve Doğa Kampı, Proje No: 111B217. Rehber, Etap I: 4-9 Temmuz 2011, Etap II: 26 Eylül-1 Ekim 2011, Bayburt.

5. YAYINLAR

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Geçici, B., Korkmaz, Ş., Özen, S., Senay, V., & Pat, S. Influence of Oxygen Partial Pressure on the Metastable Copper Oxide Thin Films. *Modern Physics Letters B*, (Accepted).

Korkmaz, Ş., Geçici, B., Korkmaz, S. D., Mohammadigharehbagh, R., Pat, S., Özen, S., Senay, V., & Yudar, H. H. (2016). Morphology, composition, structure and optical properties of CuO/Cu₂O thin films prepared by RF sputtering method. *Vacuum*, 131, 142-146.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, S. (2016). Morphological and optical comparison of the Si doped GaN thin film deposited onto the transparent substrates. *Materials Research Express*, 3(4).

Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Senay, V. (2016). The Effects of Boron Alloying on the Structural and Optical Properties of GaAs Deposited by a Thermionic Vacuum Arc Method. *Materials Focus*, 5(1), 1-4.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2016). Optical, morphological properties and surface energy of the transparent $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) thin film as anode material for secondary type batteries. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(10), 105303.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical, Structural and Morphological Characterization of a Zn-Doped GaAs Semiconducting Thin Film Produced by Thermionic Vacuum Arc. *Materials Focus*, 4(6), 397-402.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical, structural, morphological and compositional characterization of a Co-doped GaAs semiconducting thin film produced by thermionic vacuum arc. *Journal of Alloys and Compounds*.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical, morphological and mechanical properties of an Al- Al_2O_3 nanocomposite thin film grown by thermionic vacuum arc. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*.

Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Senay, V. (2016). Heavily carbon doped GaAs nanocrystalline thin film deposited by thermionic vacuum arc method. *Journal of Alloys and Compounds*, 657, 711-716.

Pat, S., Senay, V., Özen, S., & Korkmaz, Ş. Surface, Nanomechanical, and Optical Properties of Mo-Doped GeGaAs Thin Film Deposited by Thermionic Vacuum Arc. *Journal of Electronic Materials*, 1-7.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., Geçici, B., & Korkmaz, Ş. (2015). A new method for titania thin film production Thermionic vacuum arc method. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705715614060.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Investigation on the morphology and surface free energy of the AlGaIn thin film. *Journal of Alloys and Compounds*, 653, 162-167.

Pat, S., Özen, S., Senay, V., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical and surface properties of optically transparent Li_3PO_4 solid electrolyte layer for transparent solid batteries. *Scanning*.

Pat, S., Özen, S., Senay, V., Korkmaz, Ş., & Şimşek, V. (2015). Optical and surface properties of the In doped GaAs layer deposition using thermionic vacuum arc method. *Scanning*.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Characterization of a fast grown GaAs:Sn thin film by thermionic vacuum arc. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1-5.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). The influence of voltage applied between the electrodes on optical and morphological properties of the InGaN thin films grown by thermionic vacuum arc. *Scanning*.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Some physical properties of a Si-doped nano-crystalline GaAs thin film grown by thermionic vacuum arc. *Vacuum*, 119, 228-232.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). AlGaAs film growth using thermionic vacuum arc (TVA) and determination of its physical properties. *The European Physical Journal Plus*, 130(6), 1-6.

Pat, S., Senay, V., Özen, S., Korkmaz, Ş., & Geçici, B. (2015). Influence of RF Power on Optical and Surface Properties of the ZnO Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 10(2), 183-186.

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical and surface properties of LiFePO₄ thin films prepared by RF magnetron sputtering. *The European Physical Journal D*, 69(3), 1-7.

Özen, S., Pat, S., Senay, V., Korkmaz, Ş., & Geçici, B. (2015). Some Physical Properties of the SiGe Thin Film Coatings by Thermionic Vacuum Arc (TVA). *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 10(1), 56-60.

Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Senay, V. (2015). GaN thin film deposition on glass and PET substrates by thermionic vacuum arc (TVA). *Materials Chemistry and Physics*, 159, 1-5.

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Deposition of a Mo doped GaN thin film on glass substrate by thermionic vacuum arc (TVA). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1-5.

Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Senay, V. (2015). Direct and fast growth of GaAs thin films on glass and polyethylene terephthalate substrates using a thermionic vacuum arc. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(4), 2210-2214.

Pat, S., Özen, S., Senay, V., Aydoğmuş T., Elmas S., Korkmaz Ş., Ekem, N., & Balbağ M. Z. (2015). A study on optical, morphological and mechanical properties of Al₂O₃ ultra-thin films deposited by RF reactive magnetron sputtering. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 9(5), 415-424.

Senay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., Aydoğmuş, T., Elmas, S., Özen, S., Ekem, N., & Balbağ, M. Z. (2014). ZnO thin film synthesis by reactive radio frequency magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 318, 2-5.

SCI, SSCI, AHCI İndeksleri Dışındaki Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Soner Özen, Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, **Volkan Senay**, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Investigation of the thickness effect to impedance analysis results AlGa_N acoustic sensor. AIP Conference Proceedings, 1722, 240004, 2016.

Soner Özen, Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, **Volkan Senay**, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Investigation Impedance analysis of nano thickness layered AlGa_N acoustic sensor deposited by thermionic vacuum arc. AIP Conference Proceedings, 1722, 240005, 2016.

Volkan Senay, Soner Özen, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Some physical properties of Co-doped GaAs thin films grown by thermionic vacuum arc. AIP Conference Proceedings, 1722, 290016, 2016.

Soner Özen, **Volkan Senay**, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Investigation of the surface free energy of the ITO thin films deposited under different working pressure. AIP Conference Proceedings, 1722, 290010, 2016.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

Mohammadigharehbagh R., Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., **Senay, V.**, & Heydarlou M. (2016). Antibacterial Activities and Physical Properties of Deposited Thin Films by RF Magnetron Sputtering Technique. IV. YUKPOP International Vacuum Workshop, 28-30 March 2016, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., Korkmaz, Ş., Pat, S., Yudar, H. & **Senay, V.** (2016). The Physical Properties of the ZNO Thin Film Prepared by RF Magnetron Sputtering Method. YUKPOP International Vacuum Workshop, 28-30 March 2016, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Some Physical Properties of a Co-Doped GaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., **Senay, V.**, Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Investigation of the Surface Energy of the ITO Thin Films Deposited Under Different Working Pressure. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., Bilgiç E., Gülmez G., **Senay, V.**, Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Investigation of the Thickness Effect to Impedance Analysis Results AlGa_N Acoustic Sensor. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

Pat, S., Özen, S., Bilgiç E., Gülmez G., Senay, V., & Korkmaz, Ş. (2015). Impedance Analysis of Nano Thickness Layered AlGa_N Acoustic Sensor Deposited by Thermionic Vacuum Arc. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24-27 August 2015, İstanbul University, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). The ITO Thin Film Production Adjustable Surface Resistance and Transparency. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), 2-4 July 2015, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). An Investigation on Surface Properties of a Sn-Doped GaAs Thin Film Produced By TVA. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), 2-4 July 2015, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Optical, Morphological and Surface Free Energy Characterization of an Al-Doped GaAs Semiconducting Film. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), 2-4 July 2015, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). The Influence on Surface Properties of Mo Doping In GaN Growth Process. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), 2-4 July 2015, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Some Physical Properties a Ge-Doped GaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).

Pat, S., Senay, V., Özen, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Morphological and Optical Investigations of an InGaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., Senay, V., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Some Physical Properties of an AlGa_N Thin Film Grown By Thermionic Vacuum Arc (TVA). 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).

Korkmaz, Ş., Özen, S., Senay, V., & Pat, S. (2015). Investigation of the Optical and Surface Properties of InGa_N Semiconductor. 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., & Korkmaz, Ş. (2015). Direct and Fast Growth of a Si:GaAs Thin Film by Means of Thermionic Vacuum Arc (TVA). The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2015), 24-28 May 2015, Belek, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Pat, S., Özen, S., Senay, V., Korkmaz, Ş., & Pat, Z. (2015). Solid State Battery Manufacturing with Thermionic Vacuum Arc and RF Sputtering. The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2015), 24-28 May 2015, Belek, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Özen, S., Pat, S., Korkmaz, Ş. & Senay, V. (2015). Mo doped GaN Thin Film Growth Using Thermionic Vacuum Arc (TVA). The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2015), 24-28 May 2015, Belek, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Senay, V., Özen, S., Pat, S., Geçici, B., & Korkmaz, Ş. (2014). TiO₂ Thin Film Production by Thermionic Vacuum Arc. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

Pat, S., Senay, V., Özen, S., Korkmaz, Ş., & Geçici, B. (2014). The Effects of RF Input Power on the Optical and Structural Properties of Sputtered ZnO Thin Films. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

Özen, S., Pat, S., Senay, V., Korkmaz, Ş., & Geçici, B. (2014). Characterization of SiGe Structures Deposited by Thermionic Vacuum Arc (TVA). 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

Geçici, B. Korkmaz, Ş., Özen, S., Senay, V., Aydoğmuş, T., & Pat, S. (2014). Copper Oxide Thin Film Production by Reactive RF Magnetron Sputtering. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

Özen, S., Pat, S., Senay, V., & Korkmaz, Ş. (2014). Some Physical Properties of the BaTiO₃ Thin Films Coated by TVA Plasma Production Technique. *International Middle East Plasma Science (IMEPS)* Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Pat, S., Ekem N., Balbağ, M. Z., Korkmaz, Ş., Aydoğmuş, T., Özen, S., & Senay, V. (2014). Reactive Thermionic Vacuum Arc (R-TVA) System. *International Middle East Plasma Science (IMEPS)* Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Senay, V., Pat, S., Özen, S., & Korkmaz, Ş. (2014). Deposition of Al₂O₃ Ultra-thin Layers by Radio-Frequency Magnetron Sputtering and Study of Their Optical, Morphological and Mechanical Properties. *International Middle East Plasma Science (IMEPS)* Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

Aydoğmuş, T., Ekem N., Pat, S., Korkmaz, Ş. Balbağ, M. Z., Elmas, S., Özen, S., & Senay, V. (2013). Cr₂O₃ Thin Film Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering. Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

Senay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş. Aydoğmuş, T., Elmas, S., Özen, S., Ekem N., & Balbağ, M. Z. (2014). ZnO Thin Film Synthesis by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering. 9th NanoTR Conference (Nanotr-9), 24-28 June 2013, Atatürk University, Erzurum, Turkey (Oral Presentation).

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

Soner Özen, Şadan Korkmaz, Suat Pat & **Volkan Senay** (2016). RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Üretilen ZnO İnce Filmin Bazı Fiziksel Özellikleri. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

H. Hakan Yudar, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Soner Özen, **Volkan Senay**, Zerrin Pat & Reza Mohammadigharehbagh (2016). İnce Film Piller için RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Üretilen LiCoO₂ Katı Katot Arayüzünün İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, Soner Özen, Şadan Korkmaz, **Volkan Senay**, H. Hakan Yudar & Zerrin Pat (2016). RF Magnetron Püskürtme Tekniği Kaplanan ITO İnce Filmlerin Özelliklerinin İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Volkan Senay, Suat Pat, Soner Özen & Şadan Korkmaz (2016). RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Cam Alttaş Üzerine Biriktirilen AZO İnce Filmin Bazı Fiziksel Özellikleri. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

H.Hakan Yudar, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Soner Özen & **Volkan Senay** (2016). RF Magnetron Püskürtme Tekniği ile İnce Film Lityum Piller İçin Li₃PO₄ Katı Elektrolit Arayüzünün İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Sözlü Sunum).

Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Soner Özen, **Volkan Senay**, H.Hakan Yudar & Mehdi Meskini Heydarlou (2016). RF Manyetik Püskürtme Tekniği Üretilen ITO İnce Filmlerin Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Sözlü Sunum).

Volkan Senay, Soner Özen, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh & H.Hakan Yudar (2016). TVA ile Üretilen Kurşun Katkılı Galyum Arsenik İnce Filmin Optik ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunum).

Soner Özen, Şadan Korkmaz, **Volkan Senay**, H.Hakan Yudar, Reza Mohammadigharehbagh & Suat Pat (2016). Nano Tabakalı AlGa_N Akustik Sensörün Empedans Analizi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunum).

Geçici, B., Pat, S., M. Zafer Balbağ, Özen, S., Senay, V., & Ekem N. (2014). Mineral Gözlük Camı Üzerine Çok Katmanlı SiO₂-ITO-CaF₂ Kaplama. I. Ulusal Optisyonluk Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Özen, S., Pat, S., Balbağ, M. Z., Senay, V., Geçici, B., & Ekem N. (2014). SiO₂-ITO-BaF₂ Çok Katmanlı Anti-Refle (AR) Kaplamanın Analizi. I. Ulusal Optisyonluk Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Senay, V., Pat, S., Balbağ, M. Z., Özen, S., Geçici, B., & Ekem N. (2014). TVA Tekniği ile Çok Katmanlı SiO₂-TiO-MgF₂ Anti-Refle (AR) Kaplama. I. Ulusal Optisyonluk Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Geçici, B., Korkmaz, Ş., Pat, S., Özen, S., & Senay, V. (2014). RF Manyetik Saçtırma ile Bakır Oksit Filmlerin Sentezi”, IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Kurt, F., Korkmaz, Ş., Pat, S., Keser, Ç., Özen, S., Geçici, B., & Senay, V. (2014). Termiyonik Vakum Ark ile ITO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Akkabak, S., Ekem N., Pat, S., Özen, S., Geçici, B., Senay, V., & Korkmaz, Ş. (2014). Plazma Yöntemi ile Ni/C Kompozit İnce Film Yapısının Özelliklerinin İncelenmesi”, IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Özen, S., Korkmaz, Ş., Pat, S., Geçici, B., & Senay, V. (2014). RF Manyetik Saçtırma ile Üretilen Çinko Oksit Yapıların Analizi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

Senay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., & Geçici, B., (2014). Si-Ge İnce Filmlerin Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile Üretilmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

6. ULUSLARARASI DERGİLERDE YAPILAN HAKEMLİKLER

The European Physical Journal-Plus

Science of Advanced Materials

Materials Focus

7. ALDIĞI ÖDÜLLER

Tübitak, Yayın Teşvik Ödülü - 2016 (3 Kez)

Bayburt Üniversitesi Rektörlüğü, Akademik Performans Ödülü - 2015

Tübitak, Yayın Teşvik Ödülü - 2015 (1 Kez)

