



**ATOMİK KATMAN BİRİKTİRME TEKNİĞİ KULLANILARAK OPTO-
ELEKTRONİK CİHAZ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Nuriye KAYMAK

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nuriye KAYMAK

31/03/2022

ATOMİK KATMAN BİRİKTİRME (AKB) TEKNİĞİ KULLANILARAK OPTO-ELEKTRONİK CİHAZ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Doktora Tezi)

Nuriye KAYMAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında, grafenin (Gr) üstün özelliklerini yarıiletken teknolojisiyle birleştiren bir aygıt geliştirmek üzere, Gr'in üretimindeki zorlukların aşılabilmesi, hibrit yapılarla entegrasyonun sağlanması, üretilen Gr esaslı Schottky diyotların elektriksel, yapısal olarak karakterize edilmesi ve gama ışınımının grafen esaslı aygıt performansına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda öncelikli olarak iki boyutlu (2D) Gr nanotabakalar, Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) tekniği ile bakır (Cu) folyo üzerinde başarılı bir şekilde üretildi. Raman ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) analizleri, 2D Gr nanotabakaların elde edildiğini doğruladı. Gr'nin hibrit yapılarla entegre edilmesindeki zorluğun üstesinden gelmek için, Atomik Katman Biriktirme (ALD) tekniği ile p-tipi (silikon) Si alttaş üzerine farklı oksit tabakaları (çinko oksit (ZnO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)) biriktirildi ve ardından Gr nanotabakalar bu hibrit yapılara ıslak transfer tekniği ile aktarıldı. Transfer işleminin ardından saçtırma yöntemi kullanılarak omik ve doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Oksit tabakalı Schottky yapıların elektriksel özelliklerini incelemek için frekansa ve sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ve kapasitans/iletkenlik-voltaj (C/G-V) ölçümleri karanlık ortamda gerçekleştirildi. Arayüzey durumları (D_{it}) ve seri direnç (R_s) etkilerini incelemek için de elde edilen C/G-V verileri kullanıldı. Ayrıca, gama ışınımının Gr esaslı Gr/ Al_2O_3 /p-Si Schottky yapının aygıt performansına etkisini araştırmak için aygıt gama ışınları ile 30 kGy ve 60 kGy dozlarında ışınladı. Işınlanmamış ve ışınlanmış cihazların idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (ϕ_b) ve seri direnç (R_s) gibi diyot parametreleri, Termiyonik Emisyon (TE) ve Cheung yöntemleri kullanılarak I- V verilerinden elde edildi ve birbirleriyle karşılaştırıldı. Işınlama sonrası cihazın ϕ_b değerinin arttığı ve R_s değerlerinin ışınlama dozu ile doğru orantılı ve sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği görüldü. Tezde elde edilen sonuçlara göre, Schottky bağlantılarında şeffaf bir metal kontak olarak Gr'nin kullanılmasının Gr/metal elektrot arayüzeyinde bir dipol tabakası şeklinde bir elektrostatik bariyer oluşturduğu ve yük transferiyle sonuçlandığı görüldü. Gr/Si arayüzeyinde yüksek dielektrik katsayılı bir oksit tabakasının olmasının sadece arayüzeyindeki rekombinasyonu azaltmakla kalmayıp, arayüzde kalın doğal oksit oluşumunu sınırladığı, daha yüksek bir Schottky bariyeri oluşturduğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında kapsamında elde edilen sonuçlar, üretilen aygıtların yakın kızılötesi (NIR) aktif 2D Gr temelli yarıiletken cihaz uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Bilim Kodu : 20214

Anahtar Kelimeler : Grafen, CVD, ALD, Schottky diyot, hibrit yapılar

Sayfa Adedi : 127

Danışman : Prof. Dr. Elif ORHAN

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF OPTO-ELECTRONIC DEVICE BY ATOMIC LAYER DEPOSITION METHOD

(Ph. D. Thesis)

Nuriye KAYMAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2022

ABSTRACT

In this thesis, to develop a device that combines the superior properties of graphene (Gr) with semiconductor technology, it is aimed to overcome the difficulties in the production of Gr, to provide integration with hybrid structures, to electrically and structurally characterize the produced Gr-based Schottky diodes and to investigate the effect of gamma radiation on graphene-based device performance. In this context, firstly, two-dimensional (2D) Gr nanosheets were successfully synthesized on copper (Cu) foil by Chemical Vapor Deposition (CVD) technique. Raman and TEM (Transmission Electron Microscopy) analyses confirmed that 2D Gr nanosheets were obtained. To overcome the difficulty in integrating Gr with hybrid structures, different oxide layers (Zinc oxide (ZnO) and aluminium oxide (Al_2O_3)) on p-type (silicon) Si substrate were deposited by Atomic Layer Deposition (ALD) technique and then Gr nanosheets were transferred to this hybrid structures by wet transfer technique. After the transfer process, ohmic and rectifying contacts were created by using a sputtering method. To examine the electrical properties of the oxide layered Schottky structures, current-voltage (I-V) and capacitance/conductivity-voltage (C/G-V) measurements depending on frequency and temperature were carried out under the dark. The obtained C/G-V data were also used to examine the effects of interface states (D_{it}) and series resistance (R_s). Furthermore, the device was irradiated with gamma rays at 30 kGy and 60 kGy doses to investigate the effect of gamma radiation on the device performance of the Gr-based Gr/ Al_2O_3 /p-Si Schottky structure. Diode parameters of non-irradiated and irradiated devices such as ideality factor (n), barrier height (ϕ_b), and series resistance (R_s) were extracted from I-V data by using Thermionic Emission (TE) and Cheung methods and compared with each other. After irradiation, it was observed that the ϕ_b value of the device increased and R_s values changed directly proportional to irradiation dose and inversely proportional to temperature. According to the results obtained in the thesis, it was seen that the use of Gr as a transparent metal contact in Schottky junctions creates an electrostatic barrier in the form of a dipole layer at the Gr/metal electrode interface, resulting in charge transfer. It has been observed that the presence of an oxide layer with a high dielectric coefficient at the Gr/Si interface not only reduces recombination at the interface but also limits the formation of thick natural oxides at the interface and creates a higher Schottky barrier. The results obtained within the scope of this thesis study show that the produced devices can be used in near-infrared (NIR) active 2D Gr-based semiconductor device applications.

Science Code : 20214

Key Words : Graphene, CVD, ALD, Schottky photodiode, hybrid structure

Page Number : 127

Supervisor : Prof. Dr. Elif ORHAN

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışmanın, planlanıp yürütülmesinde tecrübe ve bilgileriyle her zaman yanımda olan gerek akademik yönden gerekse kişilik yönünden örnek aldığım, çalışmalarım süresince teorik ve pratik bilgisinden istifade ettiğim “Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü”nden değerli hocam Prof. Dr. Elif ORHAN’a en içten şükranlarımı sunarım.

Tezimdeki çalışmalara akademik olarak katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi üyeleri “Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü”nden Prof. Dr. Hüseyin Ünver ve “Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı”ndan Prof. Dr. Sema Bilge OCAK’a çok teşekkür ederim.

Tezimin deneysel aşamasındaki Grafen büyütme ve transfer kısımlarında uygulamalı olarak CVD cihazının kullanımında bilgi ve deneyimlerini paylaştan 26 Mayıs 2021 tarihinde vefat eden “Bayburt Üniversitesi”nden merhum Doç. Dr. Özkan BAYRAM’a (36 yaşında) teşekkür ediyorum ve çalışmamıza katkılarından dolayı merhum hocamızı saygıyla anıyorum.

Ayrıca deneysel çalışmalarında Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi imkânlarından faydalanmamı sağlayan “Gazi Üniversitesi Fotonik Bölümü”nden Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK ve laboratuvar çalışanlarından Doç. Dr. Yunus ÖZEN ile Öğr. Gör. Halil İbrahim EFKERE’ye teşekkür ederim.

Oluşturduğum malzemelerin, I-V ve C/G-V ölçümlerinde Gaz Sensör Aygıtları Araştırma Laboratuvarındaki cihazları kullanmamızı sağlayan “Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü”nden Prof. Dr. Selim ACAR’a teşekkür ederim.

Numunelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesinde engin bilgi ve tecrübesinden yararlandığım “Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü”nden Prof. Dr. Adem TATAROĞLU’na çok teşekkür ederim.

05/2020-15 No’lu Proje kapsamında bu tez çalışmasına sağlanan finansal destek için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi’ne teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresinde maddi ve manevi gösterdikleri destek, sabır ve anlayışla her zaman yanımda hissettiğim değerli aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK TEMELLER	9
2.1. Grafen ve Grafenin Özellikleri.....	9
2.1.1. Grafen'in sentezlenmesi	13
2.1.2. Grafenin karakterizasyonu.....	20
2.1.3. Grafen transferi	24
2.2. İnce Film Büyütme Teknikleri	25
2.2.1. Atomik Katman Biriktirme (ALD).....	26
2.2.2. RF magnetron saçtırmama tekniği.....	37
2.2.3. İnce film karakterizasyonu	39
2.3. Schottky Yapılar.....	47
2.3.1. Metal yarıiletken (metal/semiconductor) MS yapı	49
2.3.2. Metal/oksit/yarıiletken (metal/oxide/semiconductor) MOS yapı	54
2.3.3. Metal/yalıtkan/yarıiletken (metal/insulator/semiconductor) MIS yapı	55
2.3.4. Grafen yarıiletken eklemler	57
2.4. Gama Işınımının Aygıt Performansına Etkileri	58

	Sayfa
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	63
3.1. Grafen Sentezlenmesi.....	63
3.1.1. Metal katalizörün temizlenmesi.....	63
3.1.2. Grafenin CVD yöntemiyle sentezlenmesi	63
3.1.3. Grafenin transferi.....	64
3.2. Schottky Yapıların Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu.....	66
3.2.1. Kristal temizleme.....	66
3.2.2. Omik kontakın oluşturulması	67
3.2.3. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının fabrikasyonu.....	68
3.2.4. ALD tekniği ile Al/ZnO/p-Si yapının fabrikasyonu.....	69
3.2.5. Doğrultucu kontakın oluşturulması	71
3.2.6. Karakterizasyon ölçümleri.....	72
4. DENEYSEL BULGULAR	75
4.1. Al/ZnO/p-Si Yapı.....	75
4.1.1. Yapısal ve görüntüleme analizi	75
4.1.2. Akım-voltaj karakteristiği.....	77
4.1.3. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj	80
4.2. Grafenin Karakterizasyonu	87
4.3. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si Yapı	89
4.3.1. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj karakteristiği.....	89
4.3.2. Gama ışının akım-voltaj karakteristiği üzerinde etkisi.....	93
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Gr'in özellikleri	12
Çizelge 2.2. ALD tekniği ile diğer ince film büyütme tekniklerinin karşılaştırılması	29
Çizelge 2.3. ALD işlemi için öncüller, sıcaklıklar ve kalınlık/döngü	37
Çizelge 2.4. Kontak çeşitlerine göre iş fonksiyonları koşulları	50
Çizelge 3.1. Altaş malzemenin özellikleri	66
Çizelge 4.1. Al/ZnO/p-Si yapının I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri	80
Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı arayüzey durumları (D_{it})	87
Çizelge 4.3. Al/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında elde edilen D_{it} değerleri.....	93
Çizelge 4.4. TE teorisinden ve Cheung metotlarından elde edilen n , ϕ_b ve R_s değerleri	97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Karbonun sekiz allotrop yapısı: a) elmas, b) grafit, c) lonsdaleit, d) C ₆₀ (buckminsterfullerene), e) C ₅₄₀ fullerene, f) C ₇₀ fullerene, g) amorf karbon ve h) karbon nanotüp.....	9
Şekil 2.2. Gr'den oluşan allotropları	10
Şekil 2.3. (a) Gr'in hegzagonal bal peteği. (b) Sıfır bant aralığına denk gelen Dirac noktalarını (K ve K') gösteren Gr'in bant yapısı. (c) K noktasının büyütülmüş hali	11
Şekil 2.4. Gr'in aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya sentezi.....	13
Şekil 2.5. Mekanik eksfoliasyonun aşamaları	14
Şekil 2.6. Gr tabakaların solvotermal destekli eksfoliasyonu ve dağılımı	15
Şekil 2.7. SiC alttaş üzerine Si'nin süblimleşmesiyle Gr sentezlenmesi.....	16
Şekil 2.8. Gr sentezi için CVD cihazının şematik görüntüsü	17
Şekil 2.9. a) Ni üzerine, b) Cu üzerine Gr oluşum aşamaları	19
Şekil 2.10. CVD metoduyla Gr oluşum mekanizması	20
Şekil 2.11. Grafit ve Gr'in Raman spektrumunun karşılaştırması	21
Şekil 2.12. Gr tabaka sayısına göre G bandındaki değişim.....	22
Şekil 2.13. G pik şiddetinin tabaka sayısına göre değişimi.....	23
Şekil 2.14. Gr tabaka sayısına göre 2D bandındaki değişim.....	24
Şekil 2.15. ALD büyüme döngüsü	28
Şekil 2.16. XY ikili reaksiyon dizisi kullanılarak ALD'nin bir döngüde öncüllerin yüzeye verilmesiyle oluşan yapının şematik gösterimidir	32
Şekil 2.17. ALD cihaz yapısının şematik görünümü	33
Şekil 2.18. ALD işlem penceresi.....	34
Şekil 2.19. a) DC saçtırma, b) RF saçtırma ve c) magnetron saçtırma	38
Şekil 2.20. a) Saçtırma tekniği şematik gösterimi, b) atomların/iyonların saçılması.....	39
Şekil 2.21. SEM bileşenleri.....	40
Şekil 2.22. Elektron tabancası	41

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. TEM cihazının bileşenleri.....	42
Şekil 2.24. AFM'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	43
Şekil 2.25. AFM çalışma prensibine göre çeşitleri	44
Şekil 2.26. SIMS'in şematik gösterimi	47
Şekil 2.27. p-tipi yarıiletken üzerindeki metal kontağın elektron enerji bant diyagramı $\phi_m < \phi_s$ a) henüz eklem oluşmamış metal, b) yarıiletken enerji bant diyagramı ve c) eklem oluştuktan sonra p-tipi yarıiletken ile metalin temas halindeki enerji diyagramı	51
Şekil 2.28. p-tipi yarıiletken üzerindeki metal kontağın elektron enerji bant diyagramı $\phi_m > \phi_s$ a) henüz eklem oluşmamış metal, b) yarıiletken enerji bant diyagramı ve c) eklem oluştuktan sonra p-tipi yarıiletken ile metalin temas halindeki enerji diyagramı	54
Şekil 2.29. MIS tabanlı fotoelektrot mekanizmasının geleneksel görünümü. a) Yalıtkan kaplı p-tipi yarıiletken üzerine yerleştirilmiş metalik toplayıcı MIS tabanlı fotoelektrotun şematik yandan görünüşü. b) p-tipi yarıiletkenli standart bir MIS nano-bağlantısı	57
Şekil 2.30. Gr/p-Si Schottky bağlantısının (a) termal dengede ve (b) ters öngerilim enerji bant diyagramları	58
Şekil 2.31. Radyasyonun türüne ve enerjisine göre sınıflandırılması	59
Şekil 2.32. Yarıiletken yapılarda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar.....	61
Şekil 3.1. a) Gr transferinin prosesi	65
Şekil 3.2. Gr aygıt üzerine transfer aşamaları	66
Şekil 3.3. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının üretim aşamaları	69
Şekil 3.4. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si Schottky yapının yapım aşaması akış şeması	69
Şekil 3.5. Al/ZnO/p-Si yapının a) şematik gösterimi, b) fotoğrafı.....	71
Şekil 4.1. ZnO filmin SIMS derinlik profili	76
Şekil 4.2. Al/ZnO/p-Si yapının yarı logaritmik I-V grafiği.....	77
Şekil 4.3. Al/ZnO/p-Si yapının dV/d(ln I)-I ve H(I)-I grafiği	78
Şekil 4.4. Al/ZnO/p-Si yapının F(V)-V grafiği	79
Şekil 4.5. Al/ZnO/p-Si yapının ölçülen C _m -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz	81

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Al/ZnO/p-Si yapının düzeltilmiş C_c -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz	82
Şekil 4.7. Al/ZnO/p-Si yapının ölçülen G_m -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz	83
Şekil 4.8. Al/ZnO/p-Si yapının düzeltilmiş G_c -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz	84
Şekil 4.9. Al/ZnO/p-Si yapının R_s -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz	86
Şekil 4.10. Raman spektrumları	88
Şekil 4.11. Al/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında (a) C-V, (b) C_c -V grafikleri	90
Şekil 4.12. Al/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında (a) G-V, (b) G_c -V grafikleri	91
Şekil 4.13. Al/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında R_s -V grafiği	92
Şekil 4.14. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapının radyasyonundan önce ve γ -radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) 300 K Ln(I)-V grafiği ve γ -radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) 315 K-405 K arasında değişen sıcaklıklarda Ln(I)-V grafikleri	94
Şekil 4.15. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapısının a) 30 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) Ln(I)-V grafiği. b) 60 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) Ln(I)-V grafiği	95
Şekil 4.16. a) Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapısının 300 K sıcaklıkta γ -radyasyonundan önce (ışsız) ve radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) akıma bağlı $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ grafikleri. Al/Gr/Al ₂ O ₃ /p-Si yapısının; b) ve c) 30 kGy, d) ve e) 60 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ grafikleri	96
Şekil 4.17. Deneysel sonuçlardaki özellikler için temel bileşen analizinin (principal component analysis-PCA) (PC1'e karşı PC2) puan dağılım grafiği (a), yükleme dağılım grafiği (b) ve biplot (c)	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. a) Gr sentezi için CVD cihazı (Protherm Furnaces- Nanovak PECVD System) (Atatürk Üni.), b) Kuartz numune tutucu üzerinde Cu metalleri.....	64
Resim 3.2. a) PMMA'nın spin kaplama tekniği ile kaplanması, b) PMMA/Gr/Cu tavlama işlemi, c-d-e) Cu'yu aşındırma, f) PMMA aşındırma işlemi ve elde edilen Gr	65
Resim 3.3. Ultrasonik yıkama banyosu.....	67
Resim 3.4. Saçtırma sistemi (Nanovak NVTS 500 Eş Saçtırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.).....	67
Resim 3.5. Termal buharlaştırma sistemi (Bes Tec Termal Buharlaştırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.).....	68
Resim 3.6. RF magnetron saçtırma (Bestec RF Magnetron Saçtırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.).....	69
Resim 3.7. a) ALD cihazının numune haznesi (Okay Tech ALD Atomry T8), b) LabVIEW ekranı (Gazi Üni. Malzeme Müh.)	70
Resim 3.8. ZnO üzerine maske kullanılarak doğrultucu kontak oluşturulması	71
Resim 3.9. I-V ölçüm cihazı (Keithley 4200-SCS Semiconductor Characterization System) (Gazi Üni. Fotonik Lab.).....	72
Resim 3.10. Kriyostat; Janis vpf-475 (Gazi Ü. Fotonik Lab.).....	72
Resim 3.11. C-V ölçüm cihazları (Janis vpf-475 kriyostat ve Lake Shore 321 Autotuning Temperature Controller cihazları) (Gazi Ü. Fotonik Lab.)	73
Resim 3.12. a) Kriyostat b) I-V ölçüm cihazı Keithley 2400 ve c) C-V ölçüm cihazı Keysight E4990A 20 Hz-10 MHz Impedance Analyzer (Gazi Üni. Gaz Sensör Aygıtları Araştırma Lab.)	73
Resim 4.1. ZnO/p-Si yapının $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ taranan alanının yüzey morfolojisi (a) 2D (b), (c) 3D	75
Resim 4.2. MLG1 numunesinin TEM görüntüsü.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
γ -ışını	Gama ışını
I_0	Ters doyma akımı
Ω	Ohm
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
$^{\circ}$	Derece
0D	Sıfır boyut
2D	İki boyut
3D	Üç boyut
A	Soğurma
A	Diyot alanı
$\text{\AA}$	Angstrom
A^*	Richardson sabiti
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Ar	Argon
Au	Altın
c	Işık hızı
C_2H_2	Asetilen
C_2H_4	Etilen
C_6H_{14}	Hekzan
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	Toluen
C_6H_6	Benzen
Cc	Hesaplanan kapasitans
CH_4	Metan
cm	Santi metre
Cm	Ölçülen kapasitans

Simgeler	Açıklamalar
Cu	Bakır
CuCl₂	Bakır klorür
D	Bir boyut
<i>d</i>	Arayüz tabakanın kalınlığı
D_{it}	Arayüzey durumu
e	Elektron yükü
E_c	İletkenlik bandı
E_f	Fermi enerjisi
E_{fm}	Metalin Fermi seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_g	Yarıiletkenin bant aralığı
eV	Elektron volt
Ev	Değerlik bandı
F	Farad
<i>f</i>	Frekans
Fe(NO₃)₃	Demir (III) nitrat
FeCl₃	Demir klorür
G_c	Hesaplanan iletkenlik
G_m	Ölçülen iletkenlik
GO	Grafen oksit
Gr	Grafen
<i>ħ</i>	Planck sabiti
H₂O	Su
HCl	Hidroklorik asit
HfO₂	Hafniyum oksit
HNO₃	Nitrik asit
I	Akım
I_{2D}	2D pikinin şiddeti
I_G	G pikinin şiddeti
Ir	İridyum
K	Kelvin
<i>k</i>	Boltzman sabiti

Simgeler	Açıklamalar
K ve K'	Dirac noktaları
k Ω	Kilo ohm
keV	Kilo elektron volt
kGy	Kilo Grey
LaB6	lantan hekzaborid
m	Metre
m/s	Metre/saniye
MeV	Mega elektron volt
mm	Mili metre
mTorr	Mili Tor
n	Grafen tabaka sayısı
n	İdealite faktörü
N₂	Azot(Nitrojen)
nA	Nano amper
Ni	Nikel
nm	Nano metre
O₂	Oksijen
O₃	Oksijen
Pt	Platin
q	Elektron yükü
R_c	Kontak direnci
R_R	Doğrultma oranı
R_s	Seri direnç
Ru	Rutenyum
sccm	Dakikada standart santimetreküp
SiC	Silikon karbid
SiO₂	Silisyum dioksit
T	Geçirgenlik
T	Sıcaklık
TiO₂	Titanyum dioksit
TPa	Tera paskal
V	Voltaj

Simgeler**Açıklamalar**

V_i	Eklem yapının potansiyeli
W	Watt
w	Uzay yükü bölgesinin kalınlığı
w	Açısal hız
X	Yarıiletkenin elektron ilgisidir
ZnO	Çinko oksit
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti
μm	Mikro metre
π	Pi
σ	Sigma
ω	G pikinin yeri
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
α	İnce yapı sabiti
ϕ_B	Schottky bariyer yüksekliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternateif akım
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AKB	Atomik Katman Büyütme
ALD	Atomic Layer Deposition
ALE	Atomik Katman Epitaksisi
C/G-V	Kapasitans/İletkenlik-Voltaj
CNP	Karbon nanopartiküller
CTE	Termal genleşme katsayısı
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Doğru akım
FEG	Alan emisyon tabancası
FWHM	Yarı yükseklikte tam genişlik
GPD	Grafen bazlı fotodedektör

Kısaltmalar**Açıklamalar**

HEMT	Yüksek elektron-taşıyıcı-transistör
HOPG	Yüksek derecede yönlendirilmiş bir grafit
IC	Tümleşik devre
I-V	Akım-Voltaj
LaB6	Lantan hekzaborid
MBE	Moleküler demet epitaksi
MFIS	Metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken
MFISFET	Metal-ferroelektrik-IS-alan etkili transistör
MFS	Metal-ferroelektrik-yarıiletken
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken
MOS	Metal-oksit-yarıiletken
MOSFET	Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör
MPS	Metal-polimer-yarıiletken
MS	Metal-yarıiletken
PCVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PDMS	Polimerik polidimetilsiloksan
PMMA	Polimetil metakrilat
PSD	Konuma duyarlı bir dedektör
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
RF	Radyo frekansı
SBD	Schottky bariyer diyot
SBH	Schottky bariyer yükseklikleri
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SIMS	İkincil iyon kütle spektroskopisi
Si	Silikon
TE	Termiyonik emisyon
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
UHV	Ultra yüksek vakum
VdW	Van der Waals

1. GİRİŞ

Teknolojinin temelini, malzeme sistemlerinin anlaşılması oluşturur. Uygulamaya bağlı olarak belirli malzeme özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Bir malzemenin özelliklerini ne kadar çok anlarsak, teknolojiyi o kadar ileriye götürebiliriz. Bununla birlikte, bir malzemenin nasıl davrandığını etkileyebilecek başka bir şey daha vardır: o da malzemenin boyutudur. Boyutları nano ölçeğe indirildiğinde özellikleri farklılaşabilen üstün özellikler kazanabilen malzemeler vardır. Elektriksel iletkenlik, kimyasal reaktivite, mekanik özellikler ve hatta bir malzemenin ışıkla nasıl etkileşime girdiği nano ölçekte değişebilir. Nanomalzemeler genel olarak nanoskopik boyutlarının toplam sayısına göre sınıflandırılabilir: Bir malzemenin üç boyutu da nano boyutluysa, daha yaygın olarak nanoparçacık olarak bilinen 0D (sıfır boyutlu) malzeme olarak adlandırılır. Bir malzemenin iki boyutu nano boyuttaysa ve diğer boyutu çok daha büyükse (tıpkı bir parça ipin çok küçük bir boyuta küçülmesi gibi), o zaman bu 1 boyutlu (1D) malzeme veya "nanotüp/nanotel"dir. Yalnızca bir boyut nano boyutta olursa, 2 boyutlu (2D) bir malzeme olur büyük ama daha çok ince bir tabakaya benzer (bir kâğıt parçası gibi). Son olarak, eğer bir malzeme nano boyutta kabul edilebilecek kadar küçük boyutlara sahip değilse, o zaman bir nanomalzeme değildir. Bunun yerine, "yığın/hacimli" bir malzeme olarak adlandırılır ve günlük hayatımızda uğraştığımız çoğu malzeme bu sınıftadır. Nanomalzemeleri üretme ve inceleme yeteneğimiz ilerledikçe, büyüleyici ve beklenmedik yeni özellikler keşfedilecektir. Bu, gelecekteki teknolojiler için tamamen yeni yollar açacaktır. Bilim insanları, son yıllarda üstün özellikleri nedeniyle popüler bir malzeme olan Gr'in gerçek potansiyelini ortaya çıkarmak için yeni ve heyecan verici araştırmalar yapmaya odaklanmıştır.

Gr; optik, termal, mekanik ve elektriksel gibi önemli özelliklerinden dolayı elektronik ve optoelektronik cihazlar için ilgi çekici malzemelerden biridir [1-6]. Diğer birçok malzemeye kıyasla en geniş algılama alanı sağlayan Gr, ince film oluşturmaya uygun bir malzeme olduğu için yarıiletken cihaz teknolojisine kolayca entegre edilebilir. Gr, bu özellikleri nedeniyle geleceğin elektroniği için etkileyici bir malzemedir. Transistörler, elektrotlar, gaz sensörleri, fotodedektörler, güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcılar, doğrultucular, değişken bariyerli "baristör" ve bazı entegre devreler gibi çeşitli elektronik ve fotonik cihazlarda kullanılmaktadır [7-9].

Günümüzde elektronik cihazların çoğu doğru akım ile çalışmaktadır ve alternatif akımı doğru akıma çeviren sistem, diyotlar ile gerçekleştirilmektedir. Bir diyotun yapısı bir p-n bağlantısına veya Schottky kontağa dayanır. Schottky diyotlar, yüksek frekans yanıtı, çok az azınlık taşıyıcısı ve yüksek anahtarlama hızı nedeniyle tümleşik devre (integrated circuit-IC) teknolojisi için önemli yapılardır. Son yapılan çalışmalar, Gr'nin Schottky diyotlar gibi yapısal özelliklere sahip yarıiletken malzemelerle eklemler oluşturduğunu göstermiştir [7, 10]. Gr ayrıca, yüksek yük taşıyıcı mobilitesi, elektro-katalitik özellikleri ve doping malzemelerle işlevselliği nedeniyle, optoelektronik cihazlar için bir elektrot malzemesi veya transfer katmanı olarak da tercih edilmektedir [11-13]. Gr, üstün özellikleri nedeniyle metalin yerini alabilir ve böylece yarıiletkenlerle Schottky teması oluşturabilir [14, 15]. Schottky eklemi, Si, SiC ve GaAs gibi yarıiletkenlerin üzerine Gr aktarıldığında oluşur [2, 16]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, Gr teknolojik açıdan önemli bazı yarıiletken malzemelerle kullanıldığında, Gr'nin iyi bir Schottky davranışı sergilediği gözlenmiştir [17]. Gr/Si yapısı, iletkenlik ve yüksek optik şeffaflık gibi Gr özelliklerinden dolayı, mükemmel optoelektronik özellikler gösterir ve bu yapılar yüksek performanslı fotodetektörlerde ve güneş pillerinde kullanılır [3]. Ayrıca Gr, biyouyumluluk, lineer dağılım ilişkisi, ambipolar alan etkisi, kimyasal inertlik gibi nedenlerle sensörlerde de kullanılabilir [18]. Şeffaf kontak olan Gr'nin, Schottky yapılarda kullanılması, ışığın yarıiletkenine en yüksek geçirgenlikle iletilmesini sağlar. Gr-metal elektrot arasındaki iş fonksiyonu farkı, arayüzde elektrostatik bariyer oluşturan bir yük transferine neden olur. Au ve Al gibi metal katmanların (yüksek derecede yansıtıcı) geleneksel sistemlerde kullanılması, yarıiletkenine giren ışığın miktarını ve tepki vermesini sınırlar. Beyaz ışığın % 2,3'ünü soğuran ve şeffaf elektrot görevi gören saydam malzemelerden biri [19] olan Gr, yüksek optik geçirgenliği ile Schottky yapılarda metal elektrot yerine tercih edilebilir [20-24].

Hibrit Gr-yarıiletken teknolojisinde, en basit yapılara örnek Gr/Si heteroeklemidir. Gr'in üstün özelliklerini korumakla birlikte, yarıiletkenlerde kimyasal-yapısal değişikliklerden kaçınırken, homojen Gr/Si kontağı oluşturabilmek, üretimdeki zorluktur [25]. Bu zorluğa rağmen üretilen Gr tabanlı cihazlar, Gr'in avantajlarını yarıiletken teknolojisiyle birleştiren cihazlardır. Örneğin, Gr/Si yapısı en basit cihazlardan biridir [26]. Özellikle Gr/Si eklem, 3D yarıiletken ve 2D malzeme arasındaki arayüzü araştırmak için süper bir yapı olduğu fark edildikten sonra en çok çalışılan malzemelerden biri olmuştur [9].

Gr/Si yapısının üretimi için standart bir yöntem yoktur. Her yöntem kendi içinde farklı parametreler içerir. Özellikle Gr'in büyümesi, Gr'in transfer süreci, alttaş ve oksit tabakanın etkileri, alttaşın geometrisi, metal ile Gr temasının etkisi gibi parametrelerin hepsi birlikte gözden geçirilmelidir. Hem deneysel hem de teorik çalışmalarda ilerleme kaydedilmesine rağmen, Gr-yarıiletken yapısının altında yatan fizik henüz tam anlaşılmış değildir [7, 9]. Günümüze kadar bazı araştırmacıların, Gr tabanlı Schottky yapılar ile ilgili araştırmaları mevcuttur [7-9, 27]. Pratik olarak tüm yüzeyi kaplayan bir malzeme olan Gr, sensör uygulamalarında model bir malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çevre ile etkileşim açısından avantaj sağlayan diğer malzemelere göre en geniş algılama alanını sunar. Ayrıca, Gr ince film büyütme ile önemli ölçüde uyumlu olduğu için günümüzdeki teknolojilerin yarıiletken cihazlarına kolayca entegre edilebilir.

Işığın bir kısmı elektrot tarafından yansıtılabilir. Bu tür problemlerin üstesinden gelmek için Gr gibi iletken ve şeffaf iki boyutlu bir malzeme kullanılabilir. Son yıllarda Gr ve Si malzemeler arasında arayüzdeki fiziksel gerçeği araştırmak için Gr Si heteroeklem üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır [21, 26]. Bu nedenle, yüksek performanslı cihazın üretilmesi için Gr ve Si malzemeler arasında bir yalıtım tabakası önemlidir. Arayüz tabakası sadece yapıdaki sorunu azaltan elektrik alanını bastırmakla kalmaz, aynı zamanda yarıiletken ve metal arasındaki difüzyonu da önler. Bu yapılarda, arayüz tabakanın varlığı, dielektrik özelliklere sahip olan ve elektrik yüklerini depolayan bir kapasitörün özelliklerini de sağlar [22]. Bu bağlamda, arayüz tabaka kalınlığı ve arayüzey durum yoğunluğu gibi arayüzey parametreleri, bu yapıların hem dielektrik hem de elektriksel özelliklerini etkileyebilir [28, 29]. İdeal olmayan Gr-Si Schottky yapı X. Zhang, L. Zhang, Ahmed ve Chan (2018) tarafından incelenmiş ve bu kapsamda doğal oksitin (SiO_2) bir Gr-Si eklemine özelliklerini etkilediği kanıtlanmıştır [30]. Tomer, Rajput, Hudy, C. Li ve L. Li (2015) tarafından n-Si ve GaAs alttaş üzerine Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition-CVD) tekniğiyle tek katman Gr üretilmiştir ve Gr/Si (veya GaAs) yapılarda bariyer yüksekliği araştırılmıştır [31]. Luongo, Giubileo, Iemmo ve Di Bartolomeo ((2018) tarafından Gr/Si fotodiyotlarda alttaşın önemi incelenmiştir ve alttaşın Gr/p-Si Schottky diyotun performansında etkili olduğu tespit edilmiştir [32].

Günümüzde Gr tabanlı foto-diyot yapımında karşılaşılan en temel problemlerden biri üretim aşamasında yüksek verimliliğe ulaşmadaki zorluktur. Fotonu soğuracak nanomalzemelerin, düşük verimli fabrikasyondan dolayı metal elektrotlar arasındaki

bölgeye kısıtlı sayıda konumlandırılabilmesi, foto-diyotun verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorun aynı zamanda soğurma sonrasında uyarılan elektronların ilgili bölge boyunca taşınmasını da sınırlamaktadır. Bu nedenle, yüksek kontrollü Gr sentezi ile oluşturulacak Gr-Si hibrit foto-diyot cihaz tasarımı sayesinde, verimin artırılması hedeflenmektedir. Gr sayesinde elektron taşıma hızının yükseleceği beklenmektedir. Ayrıca, Gr, cihazın elektriksel direncini büyük ölçüde düşürürken, kapasitansını yükseltecektir. Böylelikle sistemin verimliliği de artırılmış olacaktır. Fotodiyot yapılarda spektral bant genişliği, malzemenin absorpsiyonu ile sınırlıdır. Gr, ultraviyolede terahertz aralığına kadar olan dalgaboyuna sahip ışığı soğurur. Dolayısıyla, Gr bazlı fotodedektörler (GPD'ler) çok daha geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilir. Tepki süresi, taşıyıcı mobilite tarafından yönetilir [33].

İki boyutlu Gr, MS (metal/yarıiletken) ve MIS (metal/yalıtkan/yarıiletken) yapılarda kullanılabilmektedir. Böylece Gr'li yapıyı birçok optik ve elektronik cihaz için olağanüstü özelliklere sahip bir cihaz haline getirebilir. Bu cihazlara Gr'in entegrasyonu, genellikle Gr/Si arayüzüne ince dielektrik katmanların birikmesini gerektirir. Gr'de bulunan tane sınırları, düzensizliklere ve kusurlara sebep olabilir ve kusur bölgelerinde seçici büyümeye yol açar.

Atomik Katman Biriktirme (AKB) (Atomic Layer Deposition-ALD), kalınlık kontrolü ile ultra ince, yüksek kaliteli filmleri biriktirme kabiliyetinden dolayı bu tabakaları biriktirmek için tercih edilen bir tekniktir. ALD, 1970'lerin sonlarında Suntola ve Finlandiya'daki çalışma arkadaşları tarafından Atomik Katman Epitaksisi (ALE) adıyla geliştirilmiş ve dünya çapında yaygın bir şekilde tanıtılmıştır [34-36]. ALD'nin başarılı bir şekilde tanıtılmasından kısa bir süre sonra, epitaksiyel bileşik yarıiletkenlere uygulanabilirliği birkaç grup tarafından gösterilmiştir [37, 38]. O zamandan beri yarıiletkenler, özellikle III-V bileşikleri, en kapsamlı incelenen malzemeler olmuştur [39, 40]. Son zamanlarda, mikroelektronik uygulamalarda boyutun küçülmesiyle artan kontrolün önem kazanması ALD'ye ilgi daha da artırmıştır [41]. Bu teknikle, atomik boyutta yüksek kalitede pürüzsüz yüzey üretilir ve film kalınlığı net bir şekilde kontrol edilebilir [42]. Ayrıca, ALD tekniği, yüksek kaliteli ince filmlerin düşük sıcaklıklarda üretilmesini sağlar, çünkü gaz fazının öncülleri çok yüksek sıcaklıklara çıkmadan yüzeyde tutulabilir [43]. Bu avantajlarından dolayı, ince film teknolojisinde eşsiz fayda sağlayan bir üretim metodudur.

Çok geniş uygulama alanı bulduğu için ALD tekniği ile üretilen ince filmlerin uygulama alanı hızla artmaktadır.

Literatürde, Gr-Si arayüz özelliklerini iyileştirmek için Si-oksit, Al_2O_3 , GrO, ZnO, SiN_x , HfO_2 gibi yalıtkan tabakalar kullanılmıştır. Yarıiletken yüzey ile yalıtkan yüzey arasındaki arayüzey kalitesi, cihazın kalitesini ve performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple kaçak akımı ve arayüz durum yoğunluğunu azaltmak için yukarıda bahsedilen yalıtkan ince filmler kullanılmaya başlamıştır. Bu malzemeler metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-oksit-yarıiletken kondüktör (MOS), metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) veya metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS), metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), MFISFET yapılar ve yüksek elektron-taşıyıcı-tarnsistörler (HEMTs) gibi yarıiletken cihazlarda MS arayüzeyinde bir yalıtkan tabaka olarak sıklıkla tercih edilmektedir. [44-47].

M/S arayüzeyde yalıtkan tabakanın oluşumu gibi çeşitli ideal olmayan durumlar, yarıiletken/yalıtkan arayüzeyde, N_{ss} 'nin enerji dağılım profilini, R_s ve homojen olmayan Schottky bariyer yüksekliklerini (SBH), MIS ve HEMT'in elektriksel özelliklerini etkiler. Metal ve yarıiletken arasındaki yalıtkan tabanın kalitesi ve kalınlığı, elektriksel özellikleri etkileyen önemli parametrelerdir [48, 49]. MS arayüzeydeki yalıtkan tabaka ile ilgili ilk çalışmayı Cowley ve Sze (1965) yapmıştır [50]. Bu çalışmada metal iş fonksiyonunun bir fonksiyonu olarak farklı metallere ait SBH'nin analizleri yer almaktadır.

MIS nanoeklem yapısı ilk olarak 1959 yılında Moll ve Garrett tarafından, voltaj kontrollü bir değişken kapasitör olarak sunulmuştur [51]. Hemen ardından, ilk defa MIS'in özellikleri, Frankl ve Lindnar tarafından analiz edilmiştir [52]. İlk başarılı MIS nanoeklem yapısı, Ligenza ve Spitzer (1960) tarafından bir Si yüzeyine Si dioksitin (SiO_2) termal olarak büyütülmesiyle yapılmıştır [53]. Literatürde, Gr/ Al_2O_3 /p-Si yapının akım voltaj [21], elektriksel [26] ve düşük frekanslarda dielektrik özellikleri incelenmiştir [22]. Lazerle desenlendirilmiş p-Si üzerine Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition- PECVD) ile büyütülmüş 3D Gr'li Schottky yapının elektriksel özellikleri [54] araştırılmıştır. Ayrıca iki tabakalı Gr CVD ile büyütülmüş ve bu yapının elektriksel özellikleri [55] incelenmiştir. İki tabakalı Gr'in akım gerilim özelliklerinin çift üstel (iki paralel diyot) davranış gösterdiği bulunmuştur. Gr/ Al_2O_3 /p-Si

Schottky yapının gama radyasyonuna maruz bırakıldıktan önce ve sonra (30 kGy 60 kGy), elektriksel [56] ve kapasitans-iletkenlik [57] karakteristikleri incelenmiştir.

Bazı araştırmacılar [58-60], malzemelerin özelliklerini modifiye etmek için malzemeyi radyasyona (gama, x-ışını, vb.) maruz bırakarak radyasyonun Schottky diyotlarının davranışı üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Çeşitli radyasyon türlerinin, Gr ve Gr bazlı yapının özelliklerini değiştirebileceği görülmüştür. Gr'in özellikleri herhangi bir şekilde modifiye edilebilirse, birçok elektronik uygulama için önemli sonuçların elde edilmesi beklenmektedir. Gr'li yapıların ışınlanması, optik ve elektriksel özelliklerini etkileyen yapısal kusurların ortaya çıkması nedeniyle düzensizlikte bir artışa sebep olur. Bu etkilerin hem radyasyon dozlarına hem de gama ışınları, nötronlar, elektronlar ve iyonlar gibi radyasyon türlerine oldukça duyarlı olduğu literatürde bildirilmiştir [57, 61, 62]. Özellikle γ -radyasyonuna maruz bırakılan aygıtların cihaz performansının ve malzemenin özelliklerinin değiştiği görülmüştür [60, 63]. Yarıiletken cihazların yüksek düzeyde radyasyona maruz kalması; kusur kümeleri, arayüzey durum yoğunluğundaki değişiklikler, boşluklar ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde örgü kusurlarının oluşmasına neden olur. Yüksek düzeyde radyasyona maruz kalan bu cihazların elektriksel özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenmektedir. Bu nedenle bu tür cihazlarda meydana gelen hasarların nedenlerinin ve bu hasarların neden olduğu etkilerin araştırılması gerekmektedir [59, 60, 62-65]. Tataroğlu ve Altındal (2006) yaptıkları çalışmada gama radyasyonunun etkisiyle cihazın seri direncinde azalma olduğunu belirtmişlerdir [62]. Selçuk, Bilge Ocak ve Yüksel (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, bir MOS yapısı, oda sıcaklığında ^{60}Co - γ -ışını radyasyonuna maruz bırakılmıştır [63]. Bu deneysel sonuçlar, dielektrik özelliklerin radyasyon dozuna ve uygulanan voltaja bağlı olduğunu göstermiştir. Bu yapıların, uygulanan radyasyonun neden olduğu kusurlardan güçlü bir şekilde etkilendiği bulunmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlar, bu yapıların dielektrik özelliklerinin gelişmesinde arayüzey polarizasyonunun rol oynadığını göstermiştir. Seri radyasyon dozlarında Gr/n-Si diyotlar için γ -ışını radyasyonunun etkileri, Xu, Bi, Xi ve Liu (2019) tarafından araştırılmıştır [66]. Gr/n-Si Schottky diyotların elektriksel özelliklerinin değiştiği, Schottky engel yüksekliğinin azaldığı ve idealite faktörünün arttığı sonucuna varılmıştır. Kutluoğlu, Öz Orhan, Bayram ve Bilge Ocak (2021) Gr/ Al_2O_3 /p-Si Schottky yapının kapasitans ve iletkenliği üzerinde gama radyasyonunun etkilerini incelemişleridir [57]. 50 ve 500 kHz frekanslarda elde ettikleri sonuca göre; artan radyasyon dozu ile Gr/ Al_2O_3 /p-Si arayüzeyindeki rekombinasyon merkezlerinin sayısındaki azalma nedeniyle Arayüz

durumu (D_{it}) değerleri azalmıştır. Seven, Öz Orhan ve Bilge Ocak (2021) gama radyasyonunun ve değişen frekansın, Gr/ Al_2O_3 /p-Si Schottky diyotun dielektrik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir [67]. Radyasyona bağlı dielektrik karakteristik parametrelerindeki değişiklikler, Gr tabanlı Schottky diyotun istenilen özelliklere göre değiştirilebileceğini göstermektedir. Yapının şekli yüksek oranda frekansa ve gama ışını radyasyonuna bağlı olduğu için frekans ve γ -ışını radyasyonu, malzemeyi kontrol etmek için bir araç olarak görülebilir. Gama radyasyonun yapıyı kontrol etme yeteneğinin gelecekteki birçok uygulama için çok faydalı olabileceği sonucunu elde etmişlerdir.

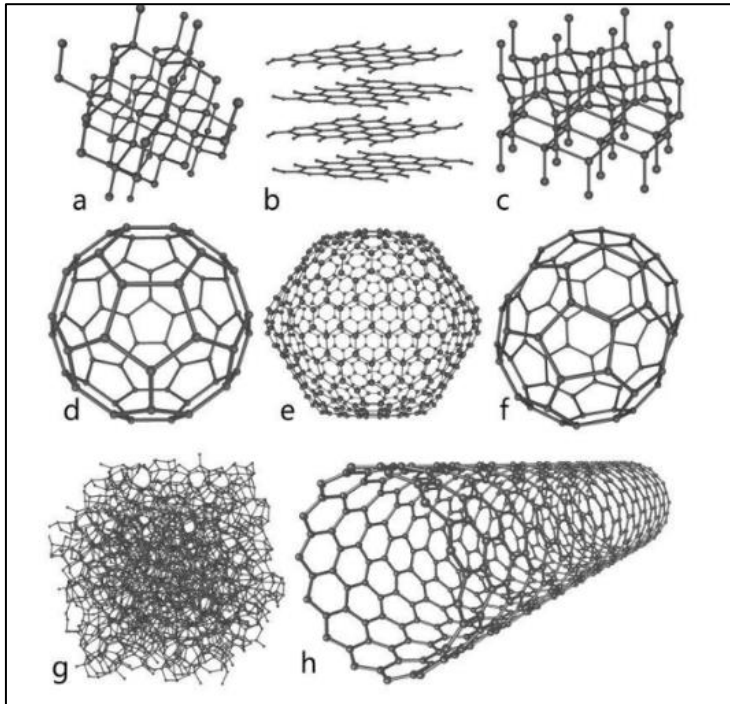
Shlimak ve Kaveh (2020), iyon ışıması nedeniyle kusurların yoğunluğunda bir artış gözlemlemiştir [68]. Elde ettikleri sonuçlar, bu artışa bağlı olarak Raman çizgilerinin genişliğinin lineer olarak arttığını göstermiştir. Literatürde iyon ışıınının [68, 69] ve γ -ışını ışıınının [70-72] Gr yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. γ -ışını ışıısından sonraki bozulma, Fan ve diğerleri [72] tarafından, Gr katmanındaki doping konsantrasyonlarındaki artışa ve kusurların ortaya çıkmasına atfedilmiştir [72]. Radyasyon kaynaklı kusurların kökenleri tam olarak bulunamamıştır ve bu kusurların atomik yapısını açıklamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır [73-76]. Sonuç olarak, elektronik uygulamalarda kullanılabilen Gr bazlı yapının elektronik özellikleri ve performansı üzerinde gama ışıınlamasının önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında, Gr'in üstün özelliklerini yarıiletken teknolojisiyle birleştiren bir aygıt geliştirmek üzere, Gr'in üretimindeki zorlukların aşılabilmesi, hibrit yapılarla entegrasyonun sağlanması, üretilen Gr esaslı Schottky diyotların elektriksel, yapısal olarak karakterize edilmesi ve gama ışıınının Gr esaslı aygıt performansına etkisinin araştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Üretilen Gr-Si hibrit yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Gr/ Al_2O_3 /p-Si yapının elektriksel özellikleri üzerinde radyasyonun etkisini de incelemek için 30 kGy ve 60 kGy dozlarında γ -radyasyonuna maruz bırakılıp akım gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Gr tabanlı diyotun sıcaklığa ve frekansa bağlı elektriksel özellikleri ve bu yapının elektriksel özelliklerinin radyasyondan nasıl etkilendiği incelenmiştir.

2. TEORİK TEMELLER

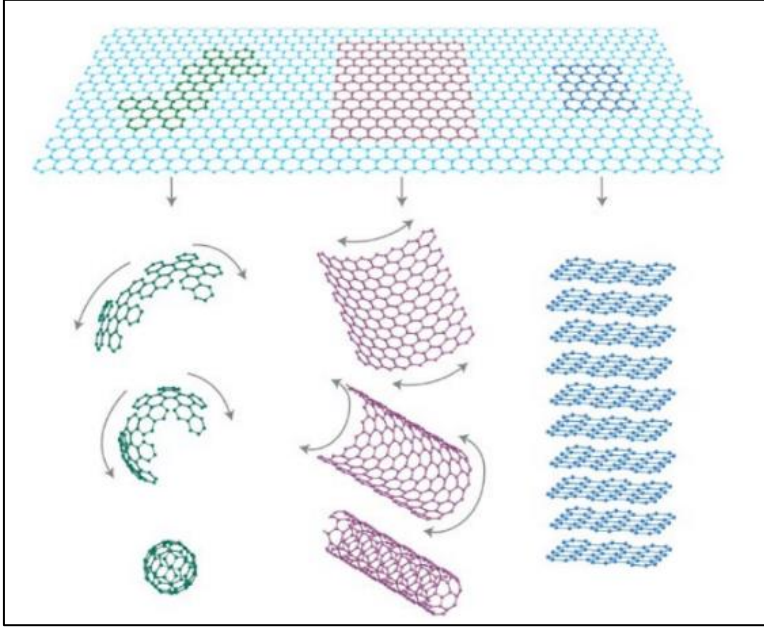
2.1. Grafen ve Grafenin Özellikleri

Son yıllarda, üstün ve eşsiz özelliklerinden dolayı en çok çalışılan malzemelerden biri grafen (Gr) ve türevleri olmuştur. Manchester Üniversitesi'nden iki bilim insanı, Andre Geim ve Kostya Novoselov, ilk kez sıradan bir bant ve grafit kullanarak, bir Gr tabakasını izole etmek suretiyle Gr'in keşfini gerçekleştirmiştir [1]. Mekanik eksfoliasyon olarak bilinen bu özel yöntemle, Gr'in keşfinden ve karakterizasyonundan dolayı, Geim ve Novoselov'un 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmesiyle birlikte, Gr bilimsel araştırmalarda ön sıralarda yer almıştır [77, 78]. Bir karbon (C) allotropu olan Gr ve karbonun diğer allotropları, Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Karbonun sekiz allotrop yapısı: a) elmas, b) grafit, c) lonsdaleit, d) C₆₀ (buckminsterfullerene), e) C₅₄₀ fulleren, f) C₇₀ fulleren, g) amorf karbon ve h) karbon nanotüp [79-81]

Gr, bir petek örgülü, iki atom birim hücreli ve iki boyutlu bir karbon allotropudur. Gr'den diğer tüm allotroplar Şekil 2.2'de gösterildiği gibi türetilir [79-81].

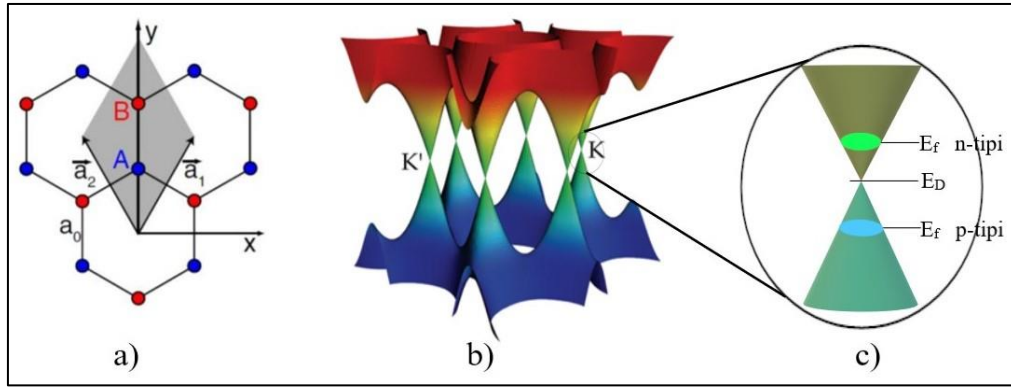


Şekil 2.2. Gr'den oluşan allotropları [79]

Örgü, 120° 'lik düzlem içi açılara sahiptir ve atomlar arası mesafe $0,142\text{ nm}$ 'dir. Her bir karbon atomu, en yakın üç komşu karbon atom ile (bağ uzunluğu $\sim 1,42\text{ Å}$ [78]) σ kovalent bağlar oluşturur. Böylece Gr, sp^2 hibrit karbon atomları yapısına sahip olup, altıgen petek örgü içinde düzenlenmiş tek atom kalınlığında, düzlemsel bir karbon atomu tabakası oluşturur. Güçlü kovalent bağlar sayesinde, Gr olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir [77, 78, 82].

Tüm karbon atomları, örgü yapısının en sağlam olacağı şekilde doldurulmuş σ bağları ve Gr içindeki akımın iletilmesini sağlayan yarı doldurulmuş π bağları ile sp^2 hibritlenir. Gr'deki üç tane komşu atomu olan bir atom için, üç tane σ -bağ ve altı tane π -bağ vardır. σ -bağları Gr'in mekanik özelliklerini belirlerken, π -bağları ise Gr'in düşük enerji seviyelerinde elektronik özelliklerini belirler [82, 83]. Gr'deki her atom doğası gereği bir yüzey atomudur ve elektronik iletimden sorumlu π bağları karbon örgünün hem üstünde hem de altında bulunmaktadır. Bu durum, yakın çevresindeki değişikliklere karşı, Gr içindeki elektronik iletimini son derece duyarlı hale getirmektedir [83]. Karbonun dört elektronu vardır. Bunlardan üçü düzlemde komşu atomlarla σ bağları oluşturmaktadır. Karbon atomunun dördüncüsü ise elektronik orbitalinin (π orbitali) düzlem dışı yönelmesi ve serbest kalmasıyla Gr'in elektronik özellikler kazanmasını sağlamaktadır [84]. Bir karbon atomunun π orbitali komşu atomun π orbitali ile çakışır. Böylece, π bağları oluşur. Bu bağlardan daha yüksek enerjiye sahip π^* anti-bağ elektronları (faz dışı) iletim bandını

oluştururken, daha düşük enerjiye sahip π bağ elektronları (faz içi) valans bandını oluşturmaktadır. İletim ve valans bantları, sıfır boşluklu yarıiletken olan lineer bant dağılımına sahip bir noktada birbirlerine temas ederek koni şeklini almaktadırlar. Bu noktaya Dirac noktası denir ve her bir Dirac noktası K ile gösterilir [77]. Gr'de Brillouin bölgesinde altı tane K noktası bulunur. Yapı içerisindeki elektronların kütsüz Dirac fermiyonları gibi davranmasından dolayı, K noktası çevresinde Gr'in davranışı lineerdir [82].



Şekil 2.3. (a) Gr'in hegzagonal bal peteği. (b) Sıfır bant aralığına denk gelen Dirac noktalarını (K ve K') gösteren Gr'in bant yapısı. (c) K noktasının büyütülmüş hali [78, 85]

Şekil 2.3.b'de Brillou bölgesinin altı noktasında konik olarak sivrilen ve birbirine temas eden değerlik ve iletim bantları görülmektedir. Bu altı konum, aynı zamanda yükün nötr noktası (carbon nanoparticles-CNP) olarak adlandırılan sıfır enerji referans noktasını tanımlar. Bu köşelerden ikisi eşdeğerdir ve tipik olarak K ve K' olarak gösterilir. Katkısız tek tabakalı Gr için, bu Dirac noktaları Fermi seviyesinde bulunur [77, 86]. K ve K' noktalarındaki öz durumlar kiralite için kuantum mekanik operatörünün öz durumlarıdır. Gr içindeki elektronlar fotonlar gibi hareket eder ve dolayısıyla oldukça yüksek bir hıza ulaşır (~ 800000 m/s). Böylece elektronların taşıyıcılık özellikleri, kütsüz parçacık olan fotonlara benzemektedir [82].

Gr'in birçoğu üst üste istiflendiğinde, grafit meydana gelir. Gr katmanlarının optik soğurması, katman sayısı ile doğru orantılıdır. Özellikle Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition-CVD), ile büyütülen Gr için katman sayısı arttıkça, soğurma artar, geçirgenlik azalır. Gr nano tabakalarının geçirgenliği, yüksek oranda kristal kalitesine bağlıdır [87-89].

İnce film sınırındaki geçirgenlik, aşağıdaki Fresnel denklemleri uygulanarak elde edilebilir [33];

$$T = (1 + 0,5\pi\alpha)^{-2} \approx 1 - \pi\alpha \approx \% 97,7 \quad (2.1)$$

Burada $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0\hbar c) = G_0 / (\pi\epsilon_0 c) \approx 1/137$ ince yapı sabitidir, $G_0 = e^2 / (4\hbar) \approx 6,08 \times 10^{-5} \Omega^{-1}$ ise optik iletkenliktir. Gr, görünür bölgede gelen ışığın yalnızca $< \% 0,1$ 'ini yansıtır, on tabaka için $\sim \%2$ 'ye yükselir. Böylece, Gr tabakalarının optik soğurması, her biri görünür spektrum üzerinde $A \approx 1 - T \approx \pi\alpha \approx 2,3$ soğuran tabaka sayısı ile orantılı olarak hesaplanabilir [33].

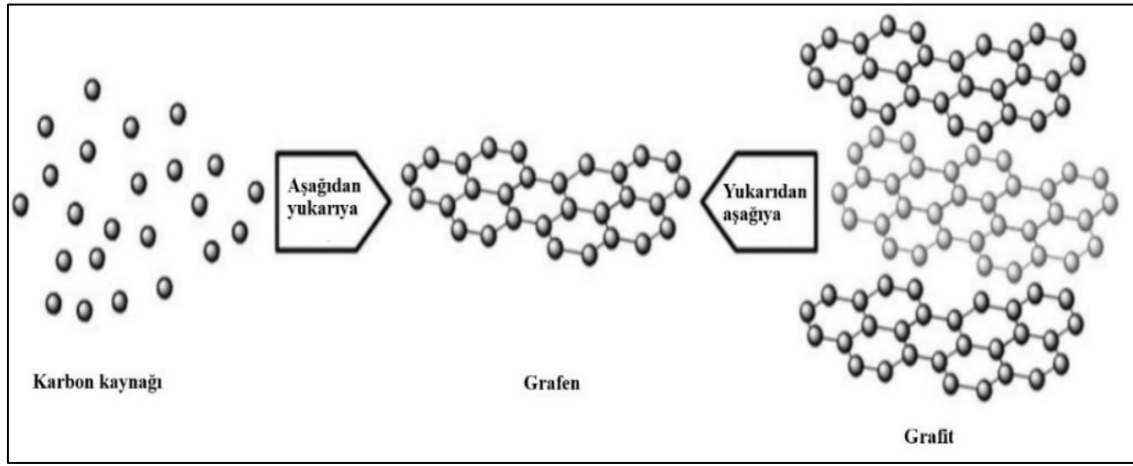
Gr'in optik şeffaflığı yalnızca $\alpha = e^2 / \hbar c$ şeklinde ince yapı sabitiyle tanımlanır; burada e elektron yükü, $\hbar$ Planck sabiti ve c ışık hızıdır. Her bir Gr tabaka görünür bölgede (400 nm-750 nm) gelen ışığın $\sim \%2,3$ 'ünü soğurur. Gr'deki optik soğurma, tabaka sayısı ile doğru orantılıdır. Gelen fotonların $\sim \%2,3$ 'lük soğrulma oranı, tek bir atomik tabaka için yüksek olmasına rağmen, şeffaf elektrotlar için oldukça düşüktür. Dolayısıyla tabaka sayısı arttıkça ışık geçirgenliğinde lineer bir azalma meydana gelir [82, 86] .

Çizelge 2.1. Gr'in özellikleri [85, 90-93]

Gr'in özellikleri	Sayısal değerler
Gr'in bir tabakasının kalınlığı	0,335 nm
Bant aralığı	0 (sıfır)
Soğurma	$\sim \%2,3$
Geçirgenlik	$\sim \%97,7$
Elektriksel direnç	$1 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Termal iletkenlik	$\sim 5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Taşıyıcı yoğunluğu	10^{13} cm^{-2}
Yük taşıyıcı hareketliliği	$\sim 250\,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Young modülü (elmasla hemen hemen aynı)	1 TPa

2.1.1. Grafen'in sentezlenmesi

Gr sentezi iki farklı yaklaşım tipine ayrılabilir; yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya. Yukarıdan aşağıya yaklaşımlar, tek Gr tabakaları elde etmek için yığılmış grafit katmanlarını parçalamayı içerirken, aşağıdan yukarıya yöntemler, alternatif karbon içeren kaynaklardan Gr sentezlemeyi içerir. Üst üste istifli Gr levhalarını yukarıdan aşağıya ayırma yöntemlerinde, katmanları bir arada tutan Van der Waals (VdW) kuvvetlerini koparmak gerekir. Bu, nispeten düşük katmanlar arası bağlanma enerjisi olmasına rağmen önemsiz bir işlem değildir [94, 95].



Şekil 2.4. Gr'in aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya sentezi [94]

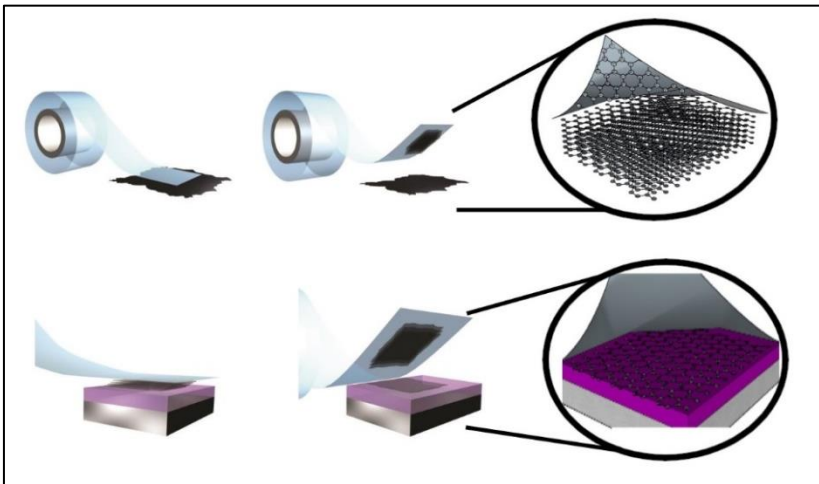
Gr ve Gr temelli nanoyapıları büyötmek için mekanik eksfoliasyon (ayırma) yöntemi, kimyasal eksfoliasyon yöntemi, epitaksiyel büyötmeye, metal katalizör üzerine CVD ve Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition-PECVD) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [7, 9, 95].

Mekanik ayırma (eksfoliasyon) yönteminde, kusursuz Gr sentezi sağlanır ancak Gr sentezi geniş alana sahip değildir, mikrometre boyutundadır. Yüksek sıcaklık ve yüksek vakum gerekliliğinden dolayı, geniş alana sahip Gr elde etmek kısıtlıdır. Kimyasal ayırma(eksfoliasyon) yöntemi ile Gr elde edilirken, Gr oksitin (GO) saf Gr'e indirgenmesi çok zor olmakla birlikte indirgeme işlemi sırasında Gr'de yapısal kusurlara neden olmaktadır. Epitaksiyel büyötmeye de ise, karbon atomlarının hekzagonal yapıyı oluşturması için SiC içerisindeki Si atomları yüksek sıcaklıkta süblimleştirilir. Arzu edilen geniş alana sahip Gr, CVD yöntemi ile alttaşlar üzerine, 1000 °C sıcaklıkta biriktirilmektedir.

CVD'nin bir türü olan PECVD yönteminde ise, sentez sıcaklığı plazmanın sağlayacağı katalitik etki ile azaltılabilmekte ve daha düşük sıcaklıkta büyütme gerçekleşmektedir [1, 88, 93, 96, 97].

Mekanik eksfoliasyon

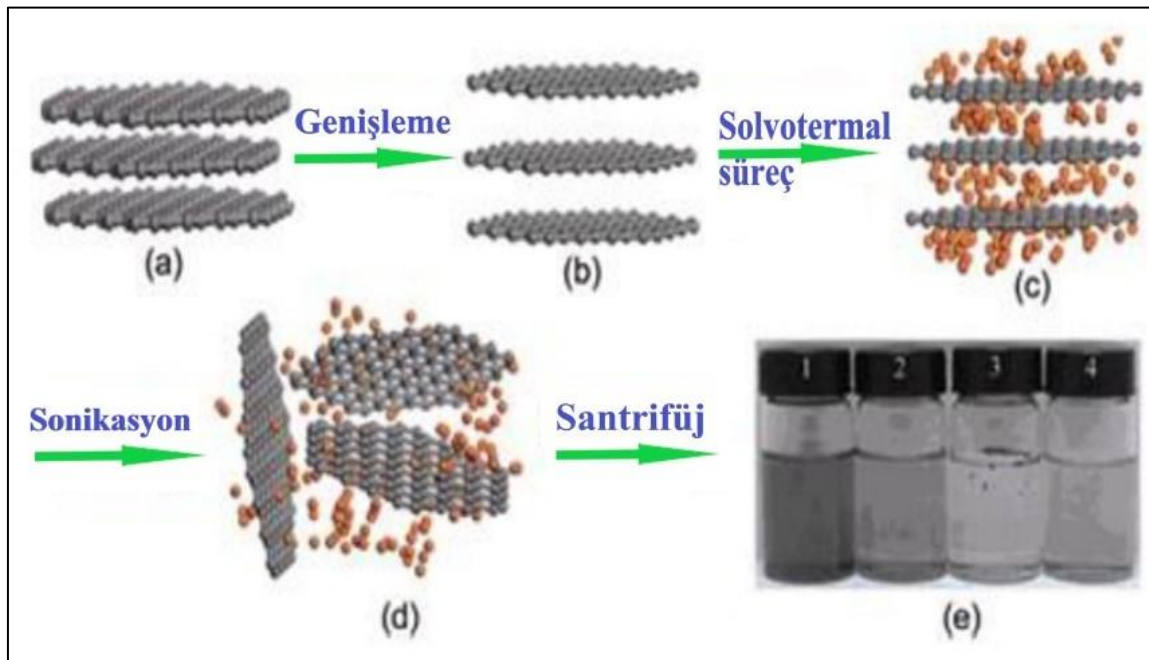
Nobel ödüllü A. Geim ve K. Novoselov tarafından popüler hale getirilen bu yöntem, tek bir grafit tabakasını izole etmek için kullanılan ilk tekniktir. Mekanizması basitçe, yüksek oranda yönlendirilmiş grafitin tek tabaka kalana dek tekrar tekrar ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Grafitin atomik düzlemleri arasındaki bağlar zayıftır. Bu zayıf bağlar VdW bağlarıdır ve etkileşimleri 2 eV/nm^2 mertebesinde. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, yüksek derecede yönlendirilmiş bir grafitten (highly oriented pyrolytic graphite- (HOPG) [1]) izole Gr tabaka elde etmek için kullanılan yöntemdir. Bu işlem için genellikle Si/Si-dioksit olmak üzere farklı alttaşlar kullanılır [91]. Mekanik eksfoliasyon ile elde edilen Gr, en iyi elektronik özellikler ve daha az kristal kusurlar sunan Gr büyütme çeşididir [98]. Ancak, yöntemi geliştirerek mevcut teknolojilerle uyumlu hale getirmek konusunda var olan zorluklar, diğer üretim tekniklerine yönelik arayış ve araştırmaları tetiklemiştir. Bu yöntemin bir diğer dezavantajı pulların boyutudur. Çeşitli araştırma alanları için yeterli olabilen, ancak endüstriyel amaçlar için uygun olmayan $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 'lik boyuta sahip Gr elde edilebilir [81, 99].



Şekil 2.5. Mekanik eksfoliasyonun aşamaları [99]

Kimyasal eksfoliasyon

Islak kimyasal yöntem olarak da bilinen kimyasal eksfoliasyon yönteminde, VdW etkileşimlerini azaltan, Gr katmanları (grafit) arasına bir reaktanın girmesiyle Gr elde edilmesidir. Bu teknikte Gr, grafitin bir asit çözeltisine (sülfürik ve/veya nitrik asit) daldırılmasıyla elde edilir. Hidrotermal yola çok benzer olan solvotermal sentez, kimyasal bileşikler üretme yöntemidir. Her ikisi de tipik olarak paslanmaz çelik bir otoklavda gerçekleştirilir. Tek fark, öncü çözeltinin genellikle susuz olmasıdır. Tipik çözücüler arasında dimetilformamid ve çeşitli alkoller bulunur. İlk olarak, bir alttaşı üzerinde biriken kolloidal bir solüsyonda asılı duran Gr oksit tabakaları oluşur (Şekil 2.6). Son aşama, saf Gr pulları elde etmek için, indirgeyici bir atmosferde oksidin, alkali çözeltiler kullanılarak veya hidrojen plazması veya hidrazin buharları veya ısı işlemler uygulanarak kaldırılmasıdır. Bu yöntemin birkaç dezavantajı vardır; indirgeme süreçleri çok verimli olmadığı için, maalesef kısmen oksitlenmiş Gr pulları elde edilir [81, 100].



Şekil 2.6. Gr tabakalarının solvotermal destekli eksfoliasyonu ve dağılımı [81]

Solvotermal destekli eksfoliasyon ve Gr tabakasının ayrılması.

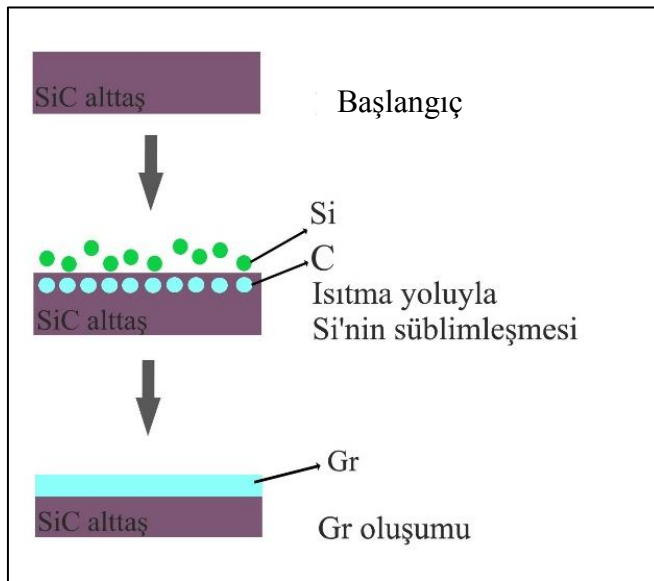
- Bozulmadan ayrılabilir grafit.
- Ayrılmış grafit.
- Grafitin ayrılmış ara katmanlarına asit eklenmesi.

- d) Exfoliasyon edilmiş Gr katmanlarının dağılması.
- e) Farklı koşullar altında elde edilmiş dört örneğin optik görüntüleri.

Diğer bir dezavantaj, kimyasal eksfoliasyon sürecinde, sp^2 benzeri Gr bağlarının kısmen sp^2 - sp^3 yapılarına indirgenmesidir. Bununla birlikte, kimyasal eksfoliasyonu içeren süreç, Gr tabakalarının boyutunun doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Örneğin, sonikasyon işlemi ne kadar uzun olursa, Gr tabakaları da o kadar küçük olur. Çünkü parçalanma kademeli olarak meydana gelir ve 10 nm'den küçük Gr pullar etmek mümkün olur [101]. Kimyasal eksfoliasyonun ana avantajı, ekonomik olarak daha uygundur; ancak kimyasal adımlardan dolayı saflık ve kalite bakımından yüksek performanslı bir yöntem değildir. Kimyasal eksfoliasyon, mürekkeplerin, toz boyaların, kompozit malzemelerin ve biyolojik uygulamaların üretimi için kullanılan çok popüler bir yöntemdir [81].

Epitaksiyel büyütme (SiC)

Silisyum karbür (SiC) üzerindeki büyümedir. Kontrollü bir Ar atmosfer basıncında (veya vakumda) c-SiC'yi yüksek sıcaklıklarda ısıtarak, yüzeye yakın Si süblime edilir fakat karbon (C) atomları süblime edilmez. Yeterince yüksek sıcaklıklarda (~ 1300 °C) karbon yeniden düzenlenir ve grafitleşme sağlanır [102]. Sonuç olarak, uygun koşullar altında çok ince bir grafit tabakası üretilmiş olur (Şekil 2.7).

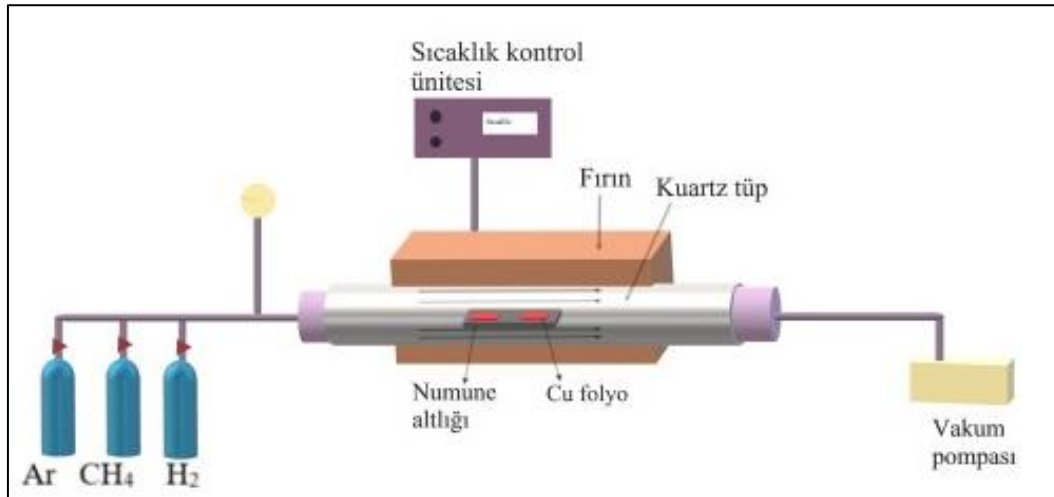


Şekil 2.7. SiC alttaş üzerine Si'nin süblimleşmesiyle Gr sentezlenmesi [81]

Si yüzeyinde elde edilen Gr'in yüksek yüzey pürüzlülüğü veya C yüzeyinde daha düşük süblimasyon sıcaklığı, Gr'in performansını sınırlayan özelliklerdir [103]. Yarıiletken endüstrisine, transistörlere ve diğer elektronik cihazlara kolayca uygulanabildiğinden epitaksiyel büyütme umut vericidir. Öte yandan, düşük sıcaklıklardaki uygulamalarda, diğer teknolojilere kıyasla Gr kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, epitaksiyel büyütmenin sadece SiC alttaş üzerinde gerçekleşmesi de uygulama alanlarını sınırlamaktadır [81].

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi

CVD diğer tekniklere göre üstün özelliklerinden dolayı özellikle yarıiletken teknolojisinde en çok kullanılan tekniktir. Gr'in metal katalizör olarak metal folyo üzerine CVD yöntemiyle büyütülmesi sırasında, karbon kaynağı olarak gaz halindeki karbon ve taşıyıcı olarak da soygaz kullanılır. CVD yönteminde Gr, hidrokarbon kaynağı olarak genellikle metan (CH_4), asetilen (C_2H_2), etilen (C_2H_4) ve hekzan (C_6H_{14}) kullanılır. Gr, bakır (Cu), nikel (Ni) gibi katalizör üzerine büyütüldükten sonra aktarılacak yapı üzerine standart yaklaşım metodu ile transfer edilir [21, 22, 26, 88] Gr sentezi için CVD cihazının temsili görünümü Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Gr sentezi için CVD cihazının şematik görüntüsü [104]

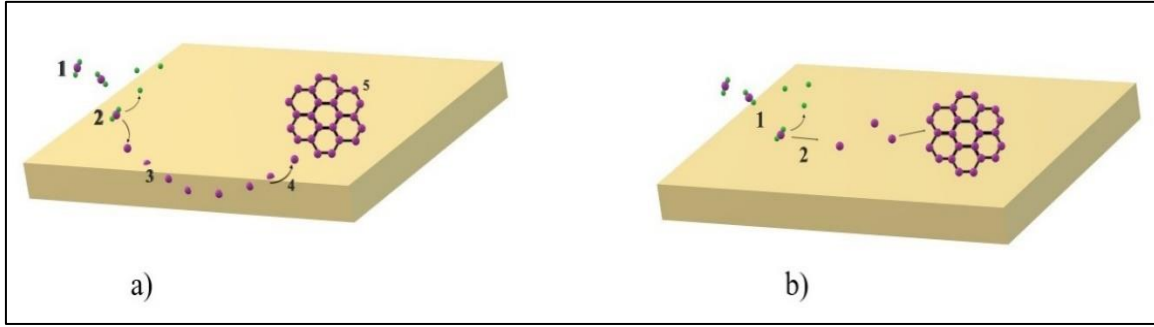
Gr büyütme sırasında kullanılan folyo Gr kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir unsurdur. CVD yönteminde metal katalizör olarak genellikle bakır (Cu), gümüş (Ag), nikel (Ni) veya altın (Au) gibi metaller kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde Cu, maliyetinin düşük olması, karbon çözünürlüğünün düşük olması, kolay ulaşılabilirliği ve tek tabaka Gr sentezine

daha iyi imkân sağlaması bakımından en çok tercih edilen metal katalizördür. En çok kullanılan diğer alttaş olan Ni ise genellikle çok tabaka Gr üretiminde tercih edilmektedir [96, 105]. Cu alttaş üzerine büyütülen Gr genellikle geniş tanecik boyutuna sahipken, Ni üzerine büyütülen Gr daha küçük tanecik boyutuna sahiptir [96, 106].

Gaz öncülünün molekülleri, yüzey tarafından soğrulan edilen farklı C_xH_y türlerinde ayrışır ve karbon birikimini kolaylaştıran düşük enerjili bir yol sağlar. Uygun koşullar altında, karbon çekirdeklenmesi başlar ve karbon tabakası yüzeyi tamamen kaplamak için büyür. CVD prosesinde en yaygın olarak kullanılan sıcaklık 1000 °C olmakla birlikte daha düşük sıcaklıklarda başarılı sonuçlar bildiren çalışmalar da mevcuttur [107]. Sıcaklığı ve basıncı azaltmak, Gr seri üretimi için daha ekonomik ve ölçeklenebilir bir teknik tasarlamının ana hedefleridir. En çok kullanılan hidrokarbonlardan biri olan CH_4 daha yüksek iyonizasyon potansiyeline ve dolayısıyla daha düşük büyüme hızına sahiptir. C_2H_2 aksine yüksek saflıktadır. Öte yandan, C_2H_2 'nin pirolizi metandan (850 °C) daha düşük, yaklaşık 700 °C'lik bir sıcaklıkta CVD prosesini başlatır. Ayrıca metan, daha fazla hidrojene filmler de sağlayabilir [108]. Yapısı benzen halkalarından oluşan, Gr yapısına benzeyen benzen (C_6H_6) ve toluen ($C_6H_5CH_3$) gibi aromatik hidrokarbon gazları ile ilginç sonuçlar elde edilmiştir ve bunların düşük sıcaklık pirolizleri, 500-600 °C'de Gr'in büyümesine izin verir [109, 110].

CVD yöntemi ile katalizör yüzey üzerine Gr büyümesi iki çeşit mekanizma ile açıklanmaktadır; [111].

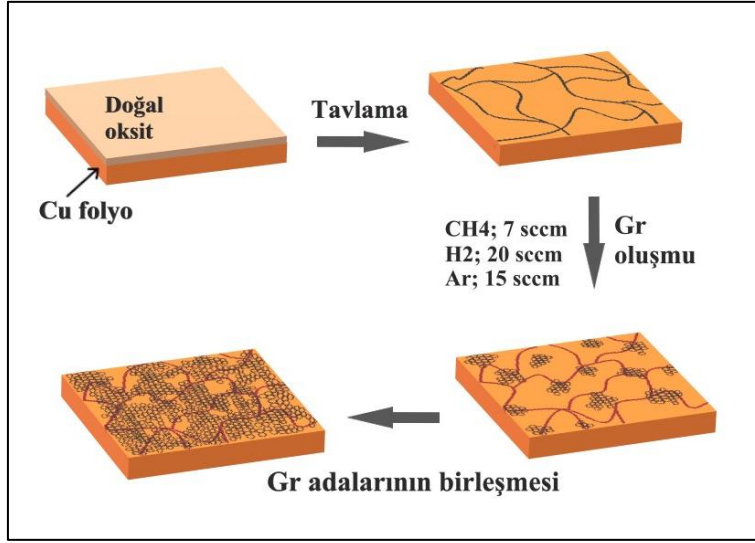
- 1) Karbon atomlarının yüzey göçü: Parçalanmış karbon atomları yüksek sıcaklıkta tavlama aşamasında katalizör (örn., Cu, Ni) yığını içine difüze olmaktadır. Soğutma süresi boyunca karbon atomları tekrar katalizör yüzeyine çıkarak Gr filmi oluşturur. Pt, Ru ve Ir gibi geçiş metallerinde de bu mekanizma ile Gr büyümesi görülmektedir.
- 2) Karbon atomlarının yüzeyde birikmesi: Burada karbon atomları yüzey göçü olmaksızın katalizör (örn.: Cu, Ni) yüzeyine doğrudan çökelir ve bir Gr tabakası oluşturur.



Şekil 2.9. a) Ni üzerine, b) Cu üzerine Gr oluşum aşamaları [88, 112]

Şekil 2.9.a'da gösterildiği gibi karbon atomlarının yüzey göçü yoluyla Gr büyütmede; metal yüzeyinde kimyasal olarak adsorbe olan hidrokarbon (aşama 1) dehidrojenasyon yoluyla ayrışır (aşama 2) ve ayrışan kristal yüzeye tutunmuş karbon atomları metal katalizör içine yayılır (aşama 3). Kimyasal absorpsiyon, elektron alıcı (akseptör) olarak kullanılmaya hazır olan geçiş metallerinin boş d-kabuğu ile gerçekleşir. Metal katalizör içindeki karbon atom konsantrasyonu, çekirdeklenme eşiğine ulaştığı zaman veya soğutma işlemi sırasında metaldeki karbon çözünürlüğü azalır ve ayrışma işlemi başlar. Fazla seyreltilmiş karbon atomları yüzeye yerleşir (aşama 4) ve daha sonra Gr oluşumu başlar (aşama 5) [88, 112].

Şekil 2.9.b'de, karbonun Cu içerisindeki çözünürlüğü düşük olduğu için kimyasal adsorpsiyon/çökme veya yüzey büyüme mekanizması, Gr oluşum mekanizmasını daha iyi açıklar. Gr'in büyümesi, hidrokarbonun ayrışmasından hemen sonra başlar ve hidrokarbon akışı kesildiğinde hemen durur (1 ve 2 basamakları). Cu üzerinde Gr'in büyümesi yüzey yoluyla ve karbonun Cu katalizöre sınırlı difüzyonu sayesinde gerçekleşmektedir. Genellikle; Cu yüzeyin, karbon öncülüne maruz kalmasıyla birlikte ilk anında çekirdeklenme ile Gr'in oluşumu başlar ve karbon öncülüne maruz kalma süresi ile çekirdeklenme adalarının sayısı artar (Şekil 2.10). Karbon atomları genellikle Cu'daki serbest elektron benzeri yüzey durumlarıyla etkileşime girer ve Cu yüzeyi üzerinde zayıf bir yüzey difüzyon bariyeri oluşturur [88, 113].



Şekil 2.10. CVD metoduyla Gr oluşum mekanizması [26, 110]

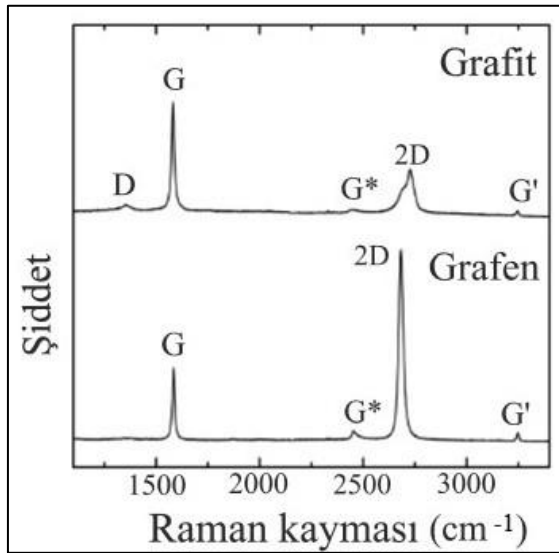
Safsızlıkların varlığı, bazı durumlarda Gr kristallerinde ve ayrıca atomik tabaka adımlarında kusurlara neden olabilir. Karbon öncül gazının yanı sıra hidrojen (H_2) de büyütme sırasında önemli bir rol oynar. İşlem sırasında, Cu üzerinde bulunan bakır oksidi (katalizör olarak uygun değildir) azaltarak reaksiyonu katalize etmek ve yan ürünleri (radikaller) sürüklemek için hidrojen eklenebilir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta hidrojene maruz kalmanın azaltıcı etkisinin, Gr'i aşındırdığı ve Gr'nin büyümesini sınırladığı bilinmektedir. Bir hidrojen ortamının, Cu'daki kusur bölgelerinde yüksek sıcaklıkta karbon zenginleştirmesini bastırması ve böylece karbon ayrışmasını etkili bir şekilde engellemesine izin vermesi beklenir [81]. Sürecin en sonunda, soğutma rampası nihai numune üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birikmenin termal genişleme katsayısı (coefficient of thermal expansion-CTE) ile alt tabakanın termal genişleme katsayısı arasında önemli bir fark varsa; çökeltme sıcaklığından oda sıcaklığına kadar olan soğutma periyodu sırasında büyük gerilimler meydana gelebilir [96].

2.1.2. Grafenin karakterizasyonu

Raman spektroskopisi, Gr tabaka sayısını, kusur içeriğini, doping seviyesini belirleyebilen, ve karbon malzemeleri karakterize etmek için kullanılan tahribatsız bir karakterizasyon yöntemidir [114]. Kısaca Raman spektroskopisi, uyarıcı fotonlar ve kristal örgü üzerindeki tetiklenen fononlar arasındaki esnek olmayan saçılmaya dayanır. Bu saçılmadan dolayı meydana gelen enerji farkı, fononlar veya ortamdaki moleküler titreşimler tarafından emilir [115]. Raman spektrometresi numune ile etkileşen yansıyan fotonları tespit eder.

Uyarıcı fotonlar ile yansıyan fotonlar arasındaki enerji farkından, izin verilen fonon uyarımları çıkarılır. Fotonlar arasında meydana gelen enerji farkından faydalanarak yapılan analiz, dalga sayısı ($1/\text{cm}$) olarak ifade edilir. Gr'deki fonon durumlarındaki bir değişiklik, elektronik durumlarda bir değişikliğe neden olduğundan, Raman spektroskopisi Gr'in elektronik durumları hakkında da bilgi sağlar [82, 115, 116].

Gr'in Raman spektrumunda Şekil 2.11'de de görüldüğü gibi üç tane temel pik vardır. Yatay eksendeki dalga boylarına denk gelen her pik, Gr'nin tabaka sayısı ve kalitesi hakkında bilgi verir. Gr ve allotroplarının Raman spektroskopisindeki karakteristik pikleri 1350 cm^{-1} (D piki), 1580 cm^{-1} (G piki) ve 2700 cm^{-1} (2D piki) civarındadır [93, 117, 118].



Şekil 2.11. Grafit ve Gr'in Raman spektrumunun karşılaştırması [118]

D piki

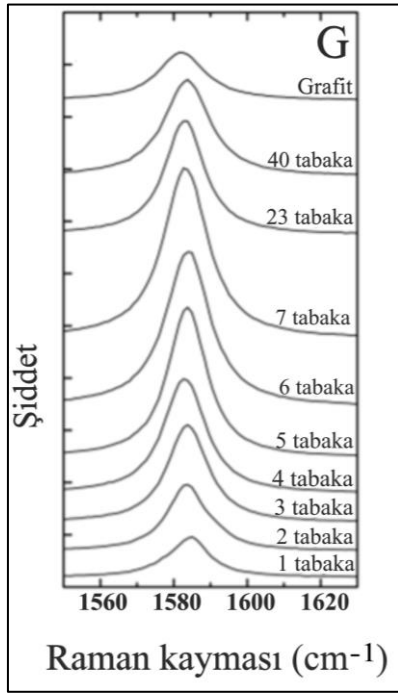
D piki, tek tabaka Gr'in Raman spektrumunda görülmez, grafitte ise diğer piklere göre şiddeti oldukça zayıftır. D pikinin varlığı ve şiddetinin fazla olması, yapıdaki düzensizlik ve kusurların varlığını ve miktarını ifade ettiği için, istenmeyen bir piktir. D pikinin şekli ve pozisyonu, Raman ölçümü sırasında kullanılan lazere bağlı olduğundan ölçüm sırasında uyarıcı lazerin frekansı değiştirilmemelidir [82, 88, 118, 119].

G piki

G piki, yapıdaki C-C gerilme titreşiminden kaynaklanır. Tek tabaka Gr'de $\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ civarındadır. G pikinin tepe noktasının yeri aşağıdaki eşitliğe göre tabaka sayısına bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.12). Tabaka sayısı arttıkça G pikinin yeri daha düşük enerji bölgesine kaymaktadır [118, 120].

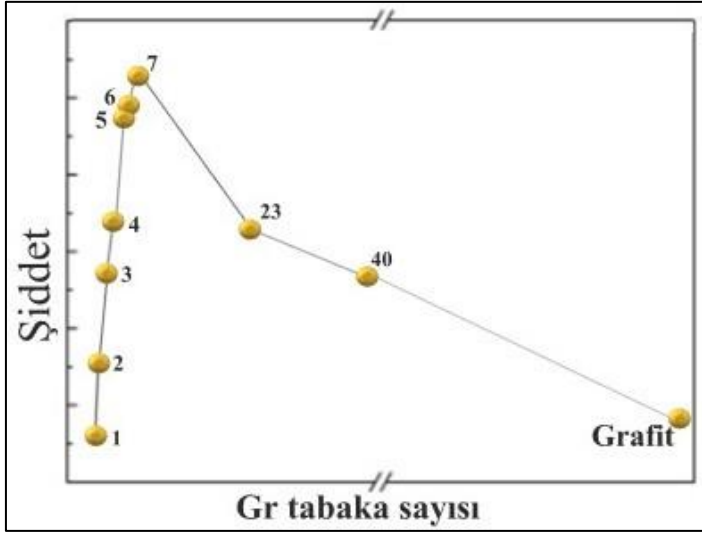
$$\omega_G = 1581,6 + 11/(1 + n^{1,6}) \quad (2.2)$$

ω_G , G pikinin yeri (dalga sayısı cinsinden); n , tabaka sayısıdır.



Şekil 2.12. Gr tabaka sayısına göre G bandındaki değişim [118]

Raman G pikinin şiddeti, Şekil 2.13'de gösterildiği gibi, 7 tabakaya kadar tabaka sayısı ile doğru orantılı olarak artar ve ardından daha çok tabakalı numuneler için (~ 23 , ~ 40 tabaka ve grafit) azalır. Literatürde, Raman G bandı şiddetinin on tabakaya kadar düzgün bir şekilde arttığı görülmüştür [121]. Spektrumdaki G pikinin şiddetindeki değişiminin 7 tabakaya kadar duyarlılığından istifade ile Gr tabaka sayısını yaklaşık olarak belirlenebilir [118].



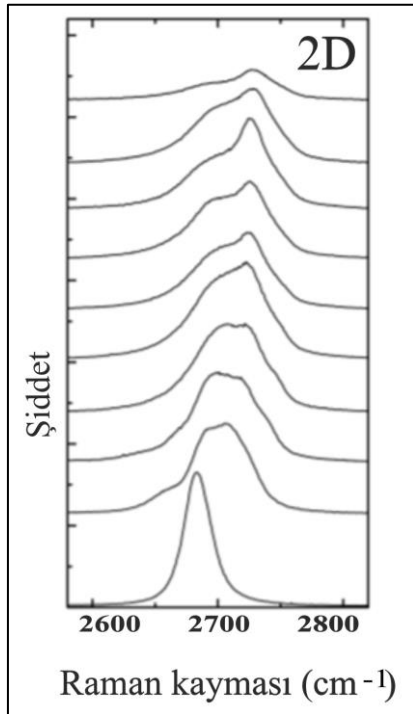
Şekil 2.13. G pik şiddetinin tabaka sayısına göre değişimi [118]

Raman spektrumundaki G pik şiddeti, gerinim, sıcaklık ve doping etkilerine karşı daha az duyarlı olduğu için bu çevresel faktörler mevcut olduğunda dahi daha güvenilir bir tabaka kalınlığı ölçümü sağlayabilmektedir. G pik şiddeti sadece Gr tabaka sayısını vermez, şiddetle kalınlık lineer değiştiği için Gr kalınlığının belirlenmesinde de rol oynamaktadır [82, 120].

2D piki

Raman spektrumundaki 2D piki, 2. derece Raman saçılmasını belirtir. 2D bant, çift rezonanslı bir Raman süreci [118, 122] ile açıklanabilir ve grafitik malzemelerin elektronik bant yapısı ile yakın bir korelasyona sahiptir [122, 123]. Tek tabaka Gr için 2D piki $\sim 2700 \text{ cm}^{-1}$ frekansa sahiptir. 2D piki, tek tabakalı ve çift tabakalı Gr'i tanımlamak için kullanılabilir [118]. Tek tabakalı Gr'in 2D pik biçimi, Şekil 2.14'de'de gösterildiği gibi diğerlerine kıyasla benzersiz bir şekilde, tek bir Lorentzian çizgi şekline ve yüksek şiddete sahip olduğu görülmektedir. Tek tabaka Gr'in Raman pikinin yarı yükseklikte tam genişliği (FWHM) yaklaşık 30 cm^{-1} 'dir [120], tabaka sayısı arttıkça ayrılma meydana geldiği için piklerin simetrisi bozulur. Şekil 2.14'den, 2D bandının 1 ila 4 tabaka için Gr tabakalarının sayısını belirlemede tam bir parmak izi görevi yaptığı açıkça görülmektedir [118]. Gr tabakalarının sayısı arttıkça elektronik bant yapısı değişir ve grafitin spektrumuna benzer [118].

2D pikinin çizgi şekli elektronik bant yapısını yansıttığından, 5 veya 6 tabakalı Gr'in elektronik bant yapısının grafitinkine çok benzer olduğu sonucu çıkarılabilir [93, 118, 120]. Artan tabaka sayısı ile birlikte 2D pikinde yüksek dalga boyuna doğru kayma da gözlenmektedir. Tek tabakalı Gr'in kalitesini ve tabaka sayısını belirlemek için 2D ve D piklerinin şiddetlerinin oranından (I_{2D}/I_G) yararlanılır. Literatürde, diğer karakteristik piklerin oranları belirlenerek kusur ve tabaka sayısı gibi bazı önemli bilgiler sağlanabilir, ancak CVD ile büyütülmüş Gr için en yaygın yaklaşım I_{2D}/I_G oranıdır. Bu oran $I_{2D}/I_G > 2$ ise tek tabaka, $I_{2D}/I_G < 2$ ise birkaç tabaka olarak adlandırılır. Yüksek kaliteli bir Gr'in I_{2D}/I_G oranının 2'ye eşit ($I_{2D}/I_G = 2$) olduğu kabul edilmektedir [96, 119-125].



Şekil 2.14. Gr tabaka sayısına göre 2D bandındaki değişim [118]

2.1.3. Grafen transferi

CVD, ekonomik maliyetle geniş alan ve yüksek kaliteli Gr üretebilmek gibi avantajları nedeniyle çeşitli sentezler arasında en yaygın şekilde kullanılan bir yöntemdir. Elektronik uygulamalarda CVD ile büyütülmüş Gr'i kullanabilmek için; metal katalizör üzerine sentezlenen Gr'nin dielektrik alttaş üzerine transfer edilmesi gerekmektedir. Son yıllarda, Gr sentezindeki ilerlemenin yanı sıra, hedef alttaşlar üzerine transfer yöntemlerinde de ilerlemeler rapor edilmiştir. Gr transferleri, ıslak ve kuru kimyasal yöntemler olmak üzere iki farklı türe ayrılır [93, 126].

Gr transferi için kullanılan ıslak transfer yöntemi, bir metal katalizörü aşındırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Transfer işlemi genellikle bir katalizör üzerine büyütülen Gr film üzerine koruyucu bir polimerik polidimetilsiloksan (PDMS) veya polimetil metakrilat (PMMA) tabakası kaplayarak ve ardından Cu gibi metal bir katalizörün aşındırma solventlerinde aşındırılmasıyla gerçekleştirilir. Cu'yu aşındırmak için demir klorür (FeCl_3), hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO_3), demir (III) nitrat ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$) ve bakır klorür (CuCl_2) gibi çözücüler kullanılır. Altında Gr bulunan PMMA, çözücü yardımıyla (aseton ve benzeri) ile aşındırılır ve istenilen alttaş üzerine Gr transfer edilir [82, 93, 126].

2.2. İnce Film Büyütme Teknikleri

İnce filmler ile ilgili tüm temel araştırmalar, genellikle, araştırılacak özelliklere bağlı olarak; birkaç Å ila yaklaşık 5000 Å arasında belirli bir kalınlık aralığıyla sınırlıdır. Buna karşın, güvenilir performansın en önemli kriter olduğu teknolojik uygulamalarda, kalınlık için alt sınır genellikle 1000 Å'dan daha yüksektir ve üst sınır 5-10 µm veya daha fazla olabilir. Hem temel araştırmalar hem de uygulamalar için bu geniş film kalınlığı aralığını kapsayarak, ince bir film, keyfi olarak birkaç Å ila 10 µm arasında değişen bir kalınlığa sahip katı bir tabaka olarak tanımlanabilir. Kalınlık sınırlaması oldukça keyfi olduğundan, biraz daha kalın filmler bile yukarıdaki tanımın kapsamına girebilir. İnce film kalınlığı için genellikle (i) ultra ince, (ii) ince (veya çok ince) ve (iii) nispeten daha kalın şeklinde kategoriler de oluşturulabilir. İlk kategori, 50-100 Å arasında veya daha küçük değerler arasında değişir. İkinci kategori, 100 Å ila 1000 Å arasında değişirken, son kategori genellikle 1000 Å'dan büyük olanları kapsar. Kategorilerin tümü, kolaylık sağlamak için keyfi olarak belirlenmiştir ve bir kategoriden diğerine geçiş bölgesi belirgin değildir [127].

İnce film büyütme, farklı teknikler kullanılarak, alttaş malzemenin üzerine atomların veya moleküllerin biriktirilmesine dayanır. Günlük yaşantımızda birçok malzemenin içerisinde kullanılan ince filmler gün geçtikçe daha da önemli hale gelmektedir. Manyetik özelliklerinden dolayı hafıza disklerinde, optiksel özelliklerinden dolayı optiksel disklerde, girişim filtrelerinde, yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, kimyasal özelliklerinden dolayı korozyona veya oksidasyona karşı korumada, sensörlerde ve elektriksel özelliklerinden dolayı yarıiletken/süperiletken cihazlarda, yalıtım ve iletim kaplamalarında, devre elemanı yapımında ince filmler kullanılmaktadır. İnce filmde beklenen etkiyi

yapıya sağlayabilmesi için, ince filmin büyütüldüğü alttaş ve özellikleri, ince film malzemesi, kalınlığı, büyütülme kalitesi dolayısıyla büyütme tekniği önem arz etmektedir [128-130].

İnce film biriktirme/büyütme üç ana kategoriye ayrılabilir: sıvı, gaz ve katı bazlı biriktirme teknikleridir. Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition-PVD) ve kimyasal buhar biriktirmeyi (CVD) de içeren bu kategoriler keskin sınırlı değildir. Atomik Katman Biriktirme (Atomic Layer Deposition-ALD), geleneksel CVD sürecinin en gelişmiş versiyonu sayılabilir [130]. Yapılmak istenen ideal yapının özelliklerini belirlemede nanoyapıların önemi artmakta ve bu doğrultuda oksit tabakanın kaplanma kalitesi önem arz etmektedir. Bununla birlikte yapılacak cihazın yapısına, kullanım alanına ve boyutuna bağlı olarak birçok kaplama tekniği vardır. Bunlardan en çok kullanılanları; döndürerek kaplama (spin coating) [131], CVD [132], reaktif buharlaştırma (reactive evaporation) [133], sol-jel [134], magnetron saçtırma (magnetron sputtering) [135] ve ALD'dir [136]. Son yıllarda ALD ile ince film biriktirme ile ilgili birçok çalışma mevcuttur [20, 29, 137]. ALD tekniği, ardışık kendi kendini sınırlayan, yüzey reaksiyonlarına dayanan bir kimyasal buhar biriktirme tekniğidir. Diğer CVD teknikleri ile karşılaştırıldığında, öncüller yüzeye ayrı ayrı döngü halinde verilir.

2.2.1. Atomik Katman Biriktirme (ALD)

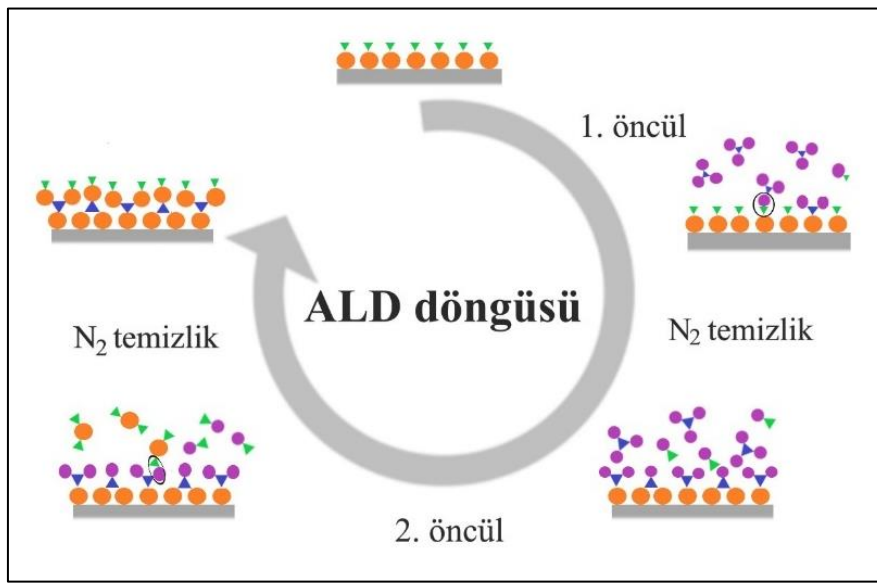
ALD, yüksek kaliteli ince filmlerin [35, 36] biriktirilmesi için benzersiz bir tekniktir. ALD'yi CVD tekniğinden ayıran karakteristik özelliği, alttaş üzerinde alternatif gazlı öncül tedarik süreci içermesidir. Diğer kimyasal buhar biriktirme tekniklerinden farklı olarak, ALD'de kaynak gazlar dönüşümlü olarak, birer birer, temizleme veya tahliye periyotları ile reaktöre gönderilir. Her öncüle maruz bırakma aşaması, yüzeyi bu öncülün monomoleküler tabakasıyla doyurur. Deneysel parametreler; yani alttaş sıcaklığı, reaktan basınçları ve bunların haznedeki süreleri, temizleme periyotlarının uzunlukları, tüm yüzey reaksiyonları doygun hale gelmesi ve temizleme adımlarıyla tamamlanmış olur. Son olarak bunlar dışındaki tüm diğer öncül moleküller yüzeyden uzaklaştırılacak şekilde ayarlanır. Bu da mükemmel tekdüzellik ve doğru film kalınlığı kontrolü gibi bir dizi avantaj sağlayan, benzersiz bir film büyüme mekanizması ile sonuçlanır [41, 130, 138, 139]. Her döngü sırasında, yüzeydeki öncül, doygunluğa ulaşır ve bir sonraki döngüye geçilir. Böylece ince film kaplama süreci, kendi kendini sınırlayan bir büyüme ile sonuçlanır [130]. ALD

tekniki ile atomik ölçekte yüksek hassasiyet içeren uygun yüzeyler üretilmesini ve film kalınlığının hassas bir şekilde kontrol edilebilmesini sağlar [140]. Ayrıca, yüksek kaliteli ince filmlerin düşük sıcaklıklarda üretilmesini sağlar, çünkü gaz fazının öncülleri çok yüksek sıcaklıklara çıkmadan yüzeyde tutulabilir [43]. Kimyasal reaksiyonlar, tek atomik katman oluşturduktan sonra doygunluğa ulaşır. Film kalınlığı döngü sayısına göre hesaplanır. Bu özellik hassas ve kolay kalınlık kontrolü sağlamanın yanında yüzeyde homojen kaplama sağlar. Bu sayede, en zorlu geometrik şekle sahip yüzeylerde ve 3D boyutlu yapılarda bile konformal kaplama yapmak mümkündür. ALD tekniği, alttaş yüzeyine çok uyumlu olmasından dolayı yüksek en-boy oranındaki 3D görünüşteki yapılarda yüksek performansla sahiptir [43]. İdeal olarak, her öncüle maruz bırakma ve ardından temizleme adımı gerçekleştirilir. Öncül moleküller, kimyasal olarak emilir veya yüzey grupları ile doygun bir şekilde reaksiyona girer ve kimyasal olarak emilen tabakanın oluşumundan sonra başka bir adsorpsiyon gerçekleşmez. Öncüllerin ayrı ayrı dozlanması, istenmeyen gaz fazı reaksiyonlarını önler. Bu da yüksek oranda reaktif öncülerin kullanımına izin verir ve her reaksiyon adımının tamamlanması için yeterli zaman tanır. Bu durum, saf filmlerin nispeten düşük sıcaklıklarda biriktirilmesiyle sonuçlanır [138]. ALD, film büyümesinin döngüsel bir şekilde gerçekleşmesi gibi belirgin bir özelliğe sahip CVD özel bir modifikasyonudur. Normal olarak bir ALD büyüme döngüsü dört aşamadan oluşur [141]:

- 1) Birinci öncülün gaz-katı reaksiyonu; tipik olarak birinci metal reaktantın (Reaktan X) kimyasal adsorpsiyon reaksiyonu.
- 2) Reaksiyon haznesinin temizlenmesi; reaksiyona girmemiş öncül ve gaz halindeki yan ürünleri uzaklaştırmak için tahliye ve temizleme.
- 3) İkinci gaz-katı reaksiyonu, ikinci reaktantın (Reaktan Y) tipik olarak metal olmayan bir öncülün kimyasal adsorpsiyon reaksiyonu.
- 4) Reaksiyon haznesinin reaksiyona girmemiş öncül ve gaz halindeki yan ürünleri çıkarmak için tekrar temizleme ve tahliyesi [138, 141].

ALD tekniği ile ince film büyütme, iki reaktan (X ve Y) kullanılarak alttaş üzerinde ikili reaksiyonlarla meydana gelir. ALD'de yüzey reaksiyonları kendi kendini sınırlar. Her döngü için bir tek tabaka ile büyümeyi sınırlayan bir dizi kimyasal reaksiyondan sonra filmi biriktirmek için alttaş ayrı ayrı X ve Y reaktanlarına tabi tutulur. İki reaktanın XYYX... reaksiyon dizisinin tek tek uygulanmasıyla, ikili reaksiyonlara dayalı bir CVD

prosesi gibi düşünülebilir. Böylece, öncül materyaller iki ayrı zamanda büyüme odasına (reaktöre-ALD çemberine) gönderilir. ALD, reaktanların tekrarlanan büyüme döngülerinde birer birer yüzey altına gönderildiği ve reaktan döngüleri arasında reaksiyon yan ürünleri ve fazla reaktanların tasfiye veya tahliye yoluyla reaktör odasından çıkarıldığı modifiye edilmiş bir CVD tekniği gibidir. Her darbe adım adım tek bir tabaka oluşturduğu için film büyümesi iyi sıralanmıştır (Şekil 2.15). Bu nedenle ALD, büyüme hızının, reaktan akışından ziyade büyüme dizisinin tekrarlama hızıyla orantılı olduğu yüzey kontrollü bir büyüme tekniğidir [142].



Şekil 2.15. ALD büyüme döngüsü [143]

Atomik Katman Biriktirme (ALD)'nin diğer tekniklerle karşılaştırılması

ALD'yi diğer film biriktirme teknikleriyle karşılaştıran birkaç çalışma vardır. Endüstride, PVD ve CVD popüler biriktirme teknikleri olmuştur ancak, nanometre boyutunda katman kalınlığı veya boşluk içermeyen katmanlar daha önemli hale geldiğinden, ALD gelişen lider teknoloji olarak kabul edilmiştir [144]. Yüksek sıcaklıklara dayanan CVD ile karşılaştırıldığında, alttaş yüzeyinde öncülü ayrıştırmak için ALD işlemleri daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. ALD'nin büyüme hızı, öncülün alttaştaki akışı ile ilgilidir. Büyüme oranını belirlemek karmaşıktır ve genellikle sıcaklık penceresi, atım başına öncülün sıcaklığının, konsantrasyonunun ve temizleme sürelerinin dengelendiği durumlarda, döngü başına büyümenin kararlı olduğu aralık içerisinde çalışır [144].

Çizelge 2.2, diğer ince film üretim tekniklerine kıyasla, ALD işlemiyle biriktirilen ince filme genel görünümü ve fiziksel özellikleri göstermektedir. ALD'nin tekdüzelik ve biriktirme kontrolü gibi kayda değer avantajları vardır. Bununla birlikte, doğal olarak katman katman biriktirme nedeniyle, birikme hızı, bu işlemin en büyük dezavantajıdır [145].

Çizelge 2.2. ALD tekniği ile diğer ince film büyütme tekniklerinin karşılaştırılması [145]

Özellik	Büyütme Tekniği					
	CVD	MBE	ALD	PLD	Buharlaştırma	Saçtırma
Büyütme oranı	İyi	Orta	Zayıf	İyi	İyi	İyi
Film yoğunluğu	İyi	İyi	İyi	İyi	Orta	İyi
Boşluğun az olması	İyi	İyi	İyi	Orta	Orta	Orta
Kalınlık homojenliği	İyi	Orta	İyi	Orta	Orta	İyi
Keskin hatlı profiller	Orta	İyi	İyi	Değişir	İyi	Zayıf
Adım kapsamı	Değişir	Zayıf	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf
Keskin arayüzler	Orta	İyi	İyi	Değişir	İyi	Zayıf
Düşük alttaş sıcaklığı	Değişir	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Pürüzsüz arayüz	Değişir	İyi	İyi	Değişir	İyi	Değişir
Plazma hasarı	Değişir	İyi	İyi	Orta	İyi	Zayıf

ALD'nin CVD ve PVD gibi diğer biriktirme teknikleri ile karşılaştırıldığında göze çarpan özelliği, her yarım döngüde öncüllerin kendi kendini sınırlayan kemisorpsiyonudur. Kemisorpsiyon, adsorbat (yüzeyde büyüyen madde) ve adsorban (yüzey) arasında kimyasal bir bağın oluştuğu adsorpsiyon tipidir. Bu durum, ALD'yi nanometreden daha ince film kalınlığı ve uygunluk açısından benzersiz kılar [144].

Atomik Katman Biriktirme (ALD)'nin avantajları ve dezavantajları

ALD, yüksek kaliteli film oluşturabilir ve en önemlisi düşük sıcaklıklarda çalışır. Ultra yüksek en-boy oranı topografileri sergileyen yüzeylerin yanı sıra kaliteli arayüzlere sahip çok katmanlı filmler gerektiren yüzeylerin kaplanması son derece etkilidir [144]. Ancak ALD süreci, bazı zorluklarla da karşı karşıyadır. ALD süreci yüksek hassasiyet gerektiren bir süreçtir ve bu genellikle fazla öncül gaz kullanımına ve enerjiye yol açar.

ALD işleminde yaklaşık %60 öncül dozajı boşa harcanır, bu da enerjinin çoğunun ve beraberindeki emeğin boşa harcandığını gösterir. Bir başka dezavantajı, esas olarak biriktirme hızından kaynaklanan ticari açıdan maliyet etkinliğidir [145].

Avantajları [145]

- Yüksek kaliteli filmler
 - a. Film kalınlığının kontrolü
 - b. Mükemmel tekrarlanabilirlik
 - c. Yüksek film yoğunluğu
 - d. Amorf veya kristal film
 - e. Ultra ince filmler
- Uygunluk
 - a. Mükemmel 3D uyumluluğu
 - b. Geniş alan kalınlığının tekdüzeliği
 - c. Atomik olarak düz ve pürüzsüz yüzey kaplama
- Zorlu Yüzeyler
 - a. Narin yüzeyler için hassas biriktirme işlemi
 - b. Düşük sıcaklık ve stres
 - c. Mükemmel yapışma
- Düşük sıcaklıkta büyütme
- Stokiyometrik kontrol
- Kendi kendini sınırlamayla ilgili doğal film kalitesi
- ALD mekanizmasının kendinden montajlı yapısı
- Çok tabakalı yapı

Dezavantajları [145]

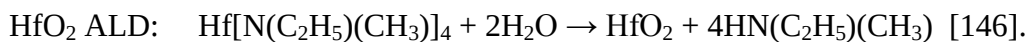
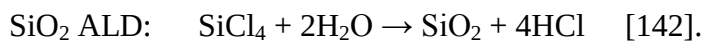
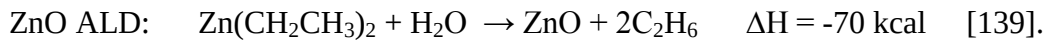
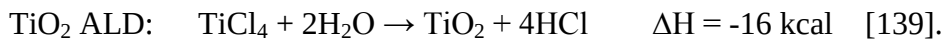
- Kimyasal reaksiyonlar için gereken süre
- Ekonomik uygulanabilirlik
- Çok yüksek malzeme israf oranı
- Çok yüksek enerji israf oranı

ALD ince film biriktirme tekniği ve hızı; alttaşın en boy oranı, biriktirilen malzeme cinsi ve reaktör tasarımı gibi faktörlere bağlıdır. Bir reaktörün yüzey alanı ve hacmindeki artış, darbe ve temizleme süresinde artışa yol açar. Yüksek en-boy oranına sahip alttaş yapısına, gazların yüzeydeki çukurlara ve üç boyutlu yapıya eşit olarak dağılması için daha uzun darbe ve temizleme süresi gerektirir [145]. ALD'nin en büyük sınırlaması yavaşlığıdır; yaklaşık 100 – 300 nm/saat büyüme oranlarıyla ince film elde edilir [142].

Farklı Atomik Katman Biriktirme (ALD) işlem modları

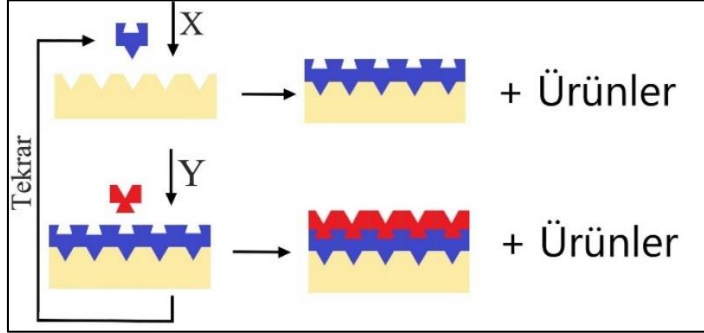
Farklı ALD işlem modları vardır ancak, en yaygın kullanılan ALD modları termal ALD ve plazma destekli ALD'dir (PEALD). Termal ALD, yalnızca yüzey reaksiyonları yoluyla gerçekleştiği için alttaş geometrisi ve reaktör tasarımından bağımsızdır. İyi bir kalınlık kontrolü ve uygunluğu sağlayan, esas olarak yüzey odaklı bir işlemdir. Termal ALD süreçleri nispeten yüksek sıcaklıklar gerektirir (tipik olarak 150–350 °C) [145].

ALD'de, alttaş, X ve Y reaktanlarına ayrı ayrı maruz bırakılır ve ince film aşamalı bir şekilde oluşturulur. ALD için genel bir tarif yapılırsa; ikili reaksiyona dayalı bir CVD işlemi gibi, X ve Y reaktanlarını ayrı ayrı ve bir XYXY... ikili reaksiyon dizisinde sırayla uygulamaktır. Bu termal ALD sistemleri, XY döngüsü başına TiO_2 için 150 ila 600 °C arasında 0,4 Å ve ZnO için 100 ila 160 °C arasında 2,2-2,5 Å büyüme sağlar. Bu ALD kimyaları, negatif reaksiyon ısılarına sahiptir. Bu reaksiyonlar, çeşitli sıcaklıklarda kendiliğinden meydana gelir ve plazma veya radikal yardımı olmadan gerçekleştirilebildikleri için termal olarak bilinirler. En yaygın termal ALD sistemleri Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO, ZrO_2 , HfO_2 ve Ta_2O_5 gibi ikili metal oksitlerdir.



Diğer yaygın termal ALD sistemleri; TiN, TaN ve W_2N gibi ikili metal nitrürlerdir. Termal ALD sistemleri ayrıca ZnS ve CdS gibi sülfürler ve GaP ve InP gibi fosfitler için de uygundur [139].

Şekil 2.16, bir döngüde öncüllerin yüzeye verilme aşamalarında yapının oluşum sürecini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.16. XY ikili reaksiyon dizisi kullanılarak ALD'nin bir döngüde öncüllerin yüzeye verilmesiyle oluşan yapının şematik gösterimidir [143]

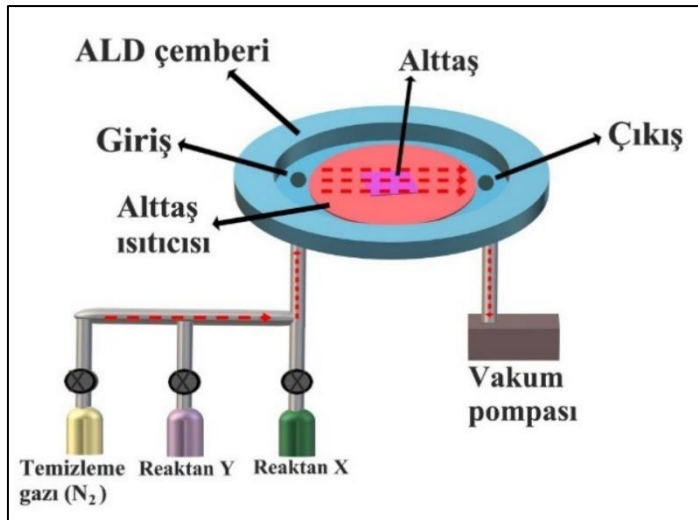
Plazma destekli ALD olarak da adlandırılan PEALD, film kalitesinden ödün vermeden biriktirme sıcaklıklarının azaltılmasını sağlayan plazma türlerinin yüksek reaktivitesine sahiptir. Özellikle sıcaklığa duyarlı malzemeler üzerine ince filmlerin büyütülmesinde kullanılır. PEALD ayrıca geliştirilmiş malzeme özelliklerine de yol açabilir. Plazmanın reaktivitesi, daha geniş bir öncül seçiminin kullanımını kolaylaştırır ve termal ALD yoluyla zorlayıcı veya erişilemeyen malzemelerin birikmesini sağlar. PEALD, nispeten düşük sıcaklıklarda biriktirmeye izin verir ve film özellikleri, termal ALD'dekinden daha iyidir. PEALD ayrıca, reaksiyonu geliştiren ve böylece daha düşük sıcaklıkların yanı sıra biriktirme için daha geniş bir alttaş ve öncül yelpazesinin kullanılmasını sağlayan oldukça reaktif türler veya katalizörler sağlar. Bu nedenle, ısıya duyarlı alttaşlar üzerinde filmin büyümesi için kullanışlı bir tekniğidir. Ayrıca termal ALD ile büyütülen filmlerden daha yüksek derecede saf filmler büyütülebilir. PEALD'in diğer avantajları, daha geniş öncül seçimi, daha yüksek büyüme oranı ve prosesin çok yönlülüğüdür [145].

Sürecin avantajlarına rağmen, PEALD ayrıca istenmeyen yan reaksiyonları da hızlandırır. Maksimum avantajları elde etmek için, proses bu optimum sıcaklık penceresi içinde olmalıdır. Aksi takdirde zayıf büyüme oranları, yavaş reaksiyon kinetiği veya öncül yoğunlaşması ve termal ayrışma meydana gelebilir. Daha önce bahsedildiği gibi, "ALD sıcaklık penceresi" büyümenin doymuş olduğu sıcaklık aralığıdır ve spesifik ALD sürecine bağlıdır [145].

Atomik Katman Biriktirme (ALD) reaktör çeşitleri

ALD reaktörü, kaynaklar ve gaz akışı için kontrol, uygun akış dinamik tasarımına sahip bir büyüme odası, ısıtılmış kaynak malzemeler için sıcaklık kontrolü, egzoz cihazları ve vakum pompaları içerir. İşlem, atmosferik basınçtan ultra yüksek vakuma (UHV) kadar değişen basınçta farklı reaktörlerde gerçekleştirilebilir. ALD reaktörleri i) CVD reaktörlerine benzer inert gaz akışlı reaktörler (1 Torr'dan daha yüksek basınçta viskoz veya geçiş akışı modunda çalıştırılır) ii) Moleküler demet epitaksi (MBE) reaktörlerine benzer yüksek veya UHV reaktörler (moleküler akış modunda çalıştırılır) olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. CVD tekniğinde olduğu gibi, ALD tekniği ile ince film büyütmede, reaktantların buhar basıncının, belirli bir alttaş sıcaklığı için aşırı doyma koşullarını karşılaması gerekir. Oksijen kaynağı olarak su kullanılan oksitlerin büyümesinde kilit faktör, tahliye süresinin kısa olması için oda ve tahliye edilecek veya temizlenecek hatların tutarlı bir şekilde ısıtılmış duvarlara ve küçük hacme sahip olması gerekliliğidir. Bu olmazsa, reaktör hatlarındaki soğuk noktalarda adsorbe edilen öncül molekülleri temizlemek için daha fazla zamana ihtiyaç duyulur [142].

Şekil 1.17'de gösterilen tipik bir yatay sıcak duvar akışlı ALD reaktörüdür. Gaz karıştırma odası ve ardından reaksiyon odası ile reaktörün açık kesiti verilmiştir. Metal öncül, oksijen öncülü ve temizleme gazı (Azot(Nitrojen- N_2)) bir hat ve valf sistemi vasıtasıyla reaktöre yönlendirilir. ALD çemberindeki reaksiyona girmemiş öncül ve gaz halindeki yan ürünleri uzaklaştırmak için vakum pompası mevcuttur.

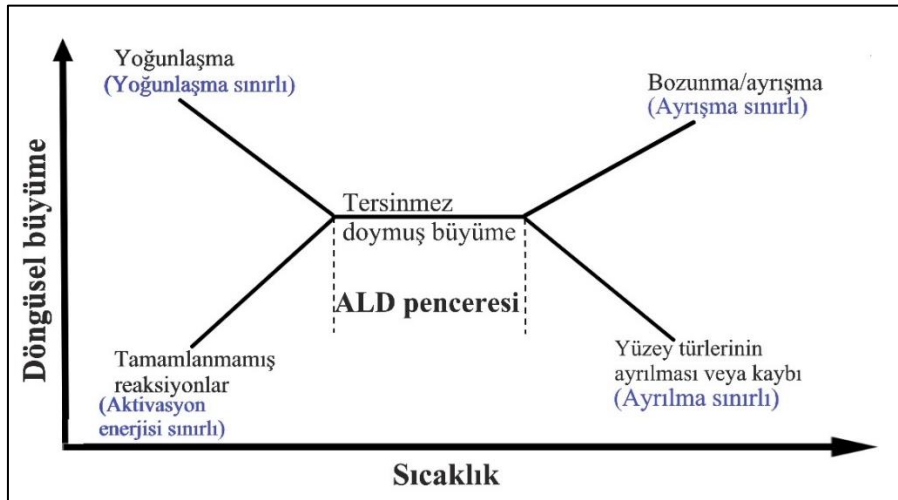


Şekil 2.17. ALD cihaz yapısının şematik görünümü [147]

Atomik Katman Biriktirme (ALD) işlem penceresi

ALD tekniğinin sınırlayıcı mekanizmaları, Şekil 2.18’de verildiği gibi işlem sıcaklığı tarafından yönetilebilir olmasıdır. ALD; sıcaklık, öncü akışı, buhar basıncı, temizleme süresi gibi faktörlerin büyüme oranında hiçbir etkisinin olmadığı, kendi kendini sınırlayan bir büyüme sürecine sahiptir. Biriktirme sıcaklığı ALD penceresinden anlaşılacağı üzere, büyüme davranışını etkiler [142].

"ALD penceresi" olarak adlandırılan işlem sıcaklık aralığı, Şekil 2.18’de gösterildiği gibi ideal olmayan bölgeler arasındaki ideale yakın ALD davranışı bölgesidir. ALD işleminin sınırlayıcı mekanizması, ALD penceresinde verilen işlem sıcaklığıyla yönetilebilir olmasıdır. Biriktirme sıcaklığı, Şekil 2.18’da gösterilen ALD işlem penceresinden anlaşılabilir şekilde büyüme davranışını etkiler. ALD işlem penceresi genellikle geniştir; bu da işlemi sıcaklık ve öncü akışlarındaki küçük değişikliklere karşı duyarsız hale getirir ve farklı malzemelerin, çok katmanlı yapılara işlenmesine izin verir [138].



Şekil 2.18. ALD işlem penceresi [139, 142]

ALD reaksiyonları genellikle 200°C ile 400°C sıcaklık aralığında gerçekleşir [142]. Daha düşük sıcaklıklarda, reaktanlar yüzeyde yoğunlaşabilir veya yüzeydeki reaksiyonları tamamlamak için yeterli termal enerjiye sahip olmayabilir [139]. Bu durumda, büyütme sıcaklığı, reaksiyonu tamamlamak için çok düşük olabilir ve reaksiyonu tamamen doyurmak için bir miktar aktivasyon enerjisi gerekir. Yani yüzey reaksiyonunun tamamlanması için termal enerji yeterli değildir.

Daha yüksek büyüme sıcaklığında ise, tek tabakalı desorpsiyonun (tutunan taneciklerin yüzeyden ayrılmasına) neden olduğu reaktif bölgelerdeki azalma nedeniyle büyüme hızı azalır. Yani, yüzey türleri ayrışabilir ve ilave reaktan adsorpsiyonuna izin verebilir. Bu davranış, tek moleküllü ayrışma yoluyla CVD'ye benzer. ALD için gereken yüzey türleri ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda yüzeyden desorbe olabilir ve ek yüzey reaksiyonları için kullanılamaz. Bu desorpsiyon, daha yüksek sıcaklıklarda döngü başına ALD büyümesinin azalmasına yol açacaktır [139]. Elektronik uygulamalar için, cihazların bozulmasını önlemek amacıyla oksitler 500°C'de veya daha düşük bir sıcaklıkta büyütülür [142].

Atomik Katman Biriktirme (ALD) öncülleri

ALD tarafından film biriktirmek için kullanılan bileşikler genellikle öncüller veya reaktanlar olarak adlandırılır. Bazen, metal bileşiği "prekürsör-öncül" ve metal olmayan bileşik "reaktan" olarak adlandırılarak bir ayırım yapılır [142]. Ancak iki terim de birbirinin yerine kullanılmaktadır. Büyüme döngüleri, istenen film kalınlığına bağlı olarak gerektiği kadar tekrarlanır. Prosese ve kullanılan reaktöre bağlı olarak, bir döngü 0,5 saniyeden birkaç saniyeye kadar sürebilir ve 0,1 ile 3 Å arasında film malzemesi biriktirebilir. Döngü süresi özellikle film oluşum reaksiyonunun tepkisine bağlıdır. Devir başına elde edilen film kalınlığı öncü molekülün boyutuna da bağlı olabilir, çünkü büyük öncüller arasındaki sterik etki (hacimce büyük olan radikal grupların kimyasal tepkime hızına etkisi) yüzeyde adsorbe edebilen moleküllerin sayısını sınırlar. Küçük moleküller ve elementler öncül olarak kullanıldığında, döngü başına tam bir tek katmanlı büyüme mümkündür. Ayrıca yüzeydeki adsorpsiyon bölgelerinin sayısı ve büyüklüğü de adsorbe edilen moleküllerin miktarını etkiler [138, 141].

ALD tekniği ile ince film üretiminde TiN, TaN, WN, NbN gibi nitritler, Al₂O₃, ZnO, HfO₂, Fe₂O₃, Cu₂O, TiO₂ gibi oksitler, Pt, Ir gibi metaller, ZnS, CdS, CdSe gibi kalkojenitler, ZnF₂, CaF₂, SrF₂ gibi floridler, W_xC gibi karbitler ve organik malzemelerin öncül gazları kullanılarak pek çok ince film kaplama işlemine olanak sağlanmaktadır [142].

ALD öncülleri katı, sıvı veya gaz olabilirken, taşıyıcı gaz kaynağı genellikle inert N₂ veya Argondur (Ar) [142]. Öncüllerin reaksiyon haznesine etkili bir şekilde aktarımı için buhar basıncı yeterince yüksek olmalıdır. Bunu için, tüm katı ve bazı sıvı öncüllerin ısıtılması

gerekir. Kendi kendini sınırlayan büyüme sayesinde, buharlaşma oranlarının sabit kalmasına yönelik işlemler CVD'ye göre daha rahattır. Bu nedenle katı öncüllerin kullanımı kolaylaşır. Yüksek sıcaklıklarda buharlaştırılan darbeli öncüllerin zorluğu, inert gaz valfi ile çözülür. Öncüller, büyüme sıcaklığında termal olarak kararlı olmalıdır. Ayrışma, kendi kendini sınırlayan büyüme mekanizmasını ve ilgili avantajları yok edecektir. Öncüller, oksit yüzeylerdeki hidroksil grupları gibi yüzey bölgeleriyle adsorbe edilmeli veya reaksiyona girmelidir. Farklı öncüller için farklı mekanizmalar bulunmuştur [141].

ALD'de kullanılan tipik metal öncülleri halojenürler, özellikle klorürler, alkil bileşikler ve alkoksitlerdir. Siklopentadienil kompleksleri ve alkil ve silil amidler gibi organo-metalik bileşikler son zamanlarda daha fazla dikkat çekmiştir [141]. Kullanılan ametal öncüller şunlardır: oksijen için su, hidrojen peroksit ve ozon; kalkojenler için hidritler; nitrojen için amonyak, hidrazin ve aminler; V. grup elementleri için hidritlerdir [138]. Bir malzemenin birden fazla öncülü olabilir, hangi öncül grubu kullanılacağı istenen amaca, büyütme şartlarına ve sıcaklığa bağlı olarak değişir [141]. Oksit filmlerin büyütülmesinde metal alkoksitler, β -diketanotlar gibi öncüler kullanılır. Sıvı enjeksiyon CVD, öncülü çözmek için genellikle eter (tetrahidrofuran) veya bir hidrokarbon (toluen, heptanlar veya nonan) bir inert çözücünün kullanıldığı oksit öncülerinin çoğunun düşük termal stabilitesi ve düşük buhar basıncı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle kullanım öncesi öncül, solüsyonun bozunmasını önlemek için büyüme sürecinde ihtiyaç duyulana kadar oda sıcaklığında tutulur. ALD işlemlerinin çoğunda oksijen kaynağı olarak su (H_2O) kullanılır, ancak ozon (O_3), oksijen (O_2) ve alkoller de kullanılabilir [142]. Birçok malzemenin farklı öncülleri ve büyütme sıcaklıkları Miikkulainen, Leskelä, Ritala ve Puurunen (2013) tarafından detaylı olarak sunulmuştur [141]. Her malzemenin büyüme sıcaklığı, reaktanları ve kalınlık ayarı için döngü sayısı farklıdır [142]. Çizelge 2.4'de en fazla kullanılan malzemeler, öncülleri, büyütme sıcaklıkları ve bir döngü başına büyütülen kalınlıkları verilmiştir.

Çizelge 2.3. ALD işlemi için öncüller, sıcaklıklar ve kalınlık/döngü [141, 142, 148-150]

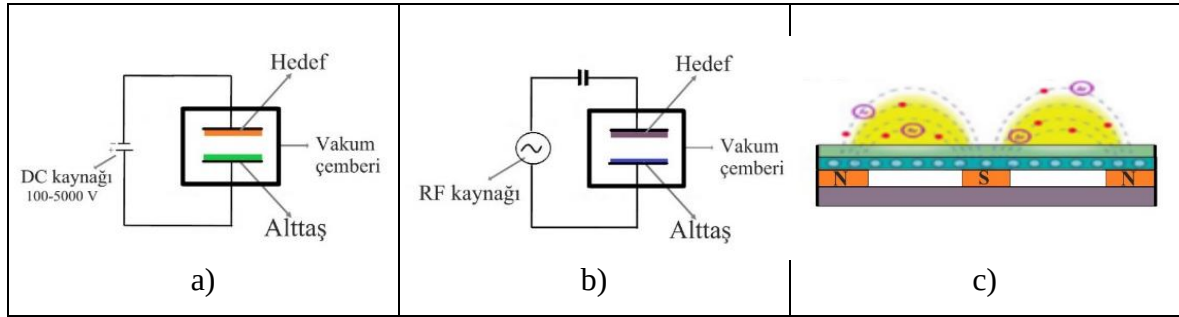
Malzeme	Öncüller	Sıcaklık	Kalınlık/Döngü
ZnO	$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2/\text{H}_2\text{O}$	200 °C	1,29 Å [142]
Al_2O_3	$\text{Al}(\text{CH}_3)_3/3\text{H}_2\text{O}$	200 °C	1,1-1,3 Å [151]
TiO_2	$\text{TiCl}_4/\text{H}_2\text{O}$	140 °C	0,07 nm [142]
HfO_2	$[(\text{CH}_3)(\text{C}_2\text{H}_5)\text{N}]_4\text{Hf}/\text{H}_2\text{O}$	200-250 °C	0,1 nm [152]
SiO_2	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3/\text{H}_2\text{O}/\text{O}_3$	100-300 °C	0,06-0,1 nm [153]
Ru	$\text{Ru}(\text{EtCp})_2/\text{O}_2$	300 °C	1,8 Å [142]
Fe_2O_3	$\text{Fe}(\text{Cp})_2/\text{O}_3$	230 °C	0,14 Å [142]
ZnS	$\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2/\text{H}_2\text{S}$	120 °C	1,9 Å [154]
Sb_2O_5	$(\text{Sb}(\text{NMe}_2)_3)/\text{O}_3$	120 °C	1,85 Å [155]
Nb_2O_3	NbI_5/O_3	320 °C	0,44 Å [142]

2.2.2. RF magnetron saçtırmama tekniği

Saıtırma tekniği, bir PVD tekniğidir. Genel olarak saıtırma tekniği, metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar vb. gibi çeşitli malzemeleri hazırlamak için kullanılabilir. Basit ekipman, kolay kontrol, geniş kaplama alanı ve güçlü yapışma avantajlarına sahiptir. 1970'lerde geliştirilen magnetron saıtırma tekniği yüksek hız, düşük sıcaklık ve düşük hasar sağlar [156].

Saıtırma tekniği, hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, atomların yüzeyden saıtırılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların buhar fazına geçerek alttaş malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Saıtırma ile kaplama ilk kez 1852 yılında Grove tarafından DC (doğru akım) akkor deşarj (glow discharge) tüpünde gözlemlenmiştir. Gaz deşarjı içinde tüpün katodunda yüksek enerjili iyonlar saıtırılması ile katot malzemesi tüpün iç kısmına biriktirilmiştir. O zamanlarda saıtırma, katodun bozulmasına neden olduğu için istenilmeyen bir durumdur. Fakat bugün saıtırma yaygın olarak yüzey temizlemede, yüzey aşındırmada, ince film biriktirmede ve yüzey analizinde kullanılmaktadır.

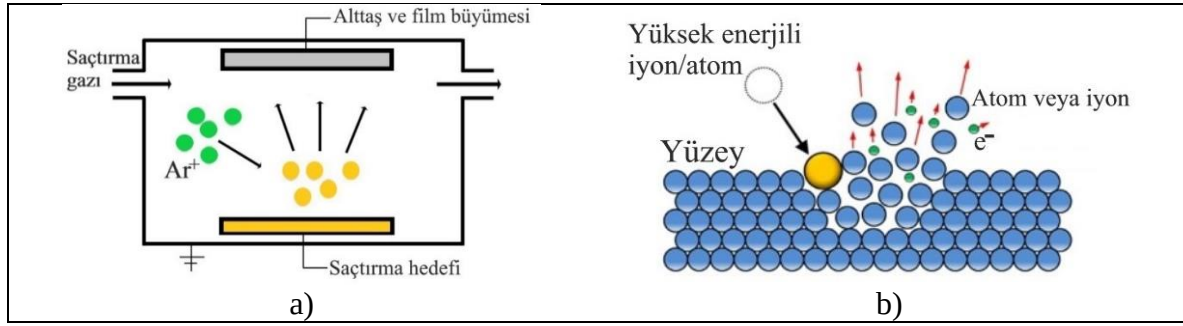
Magnetron saçtırma, doğru akım (DC) magnetron saçtırma ve radyo frekansı (RF) magnetron saçtırma gibi birçok türü içerir ve her birinin farklı bir çalışma prensibi ve uygulama amacı vardır. RF magnetron saçtırmanın DC magnetron saçtırmaya göre avantajı, elektrot olarak hedefin elektriksel olarak iletken olmasını gerektirmemesidir. Bu nedenle, herhangi bir malzeme teorik olarak RF magnetron saçtırma kullanılarak biriktirilebilir. Ancak herhangi bir magnetron saçtırma türü için ortak olan bir şey vardır. Manyetik alan ve elektrik alan arasındaki etkileşim, elektronların hedef yüzeyin yakınında sarmal oluşturmaya neden olur. Böylece, elektronların argon gazına çarpma olasılığını artırır. Üretilen iyonlar, hedefi saçtırmak için bir elektrik alanının etkisi altında hedef yüzeyle çarpışır [156].



Şekil 2.19. a) DC saçtırma, b) RF saçtırma ve c) magnetron saçtırma

Radyo Frekansı (RF) Saçtırma, belirli türdeki saçtırma hedef malzemeleri üzerinde yük birikmesini önlemek için vakum ortamındaki akımın elektrik potansiyelinin radyo frekanslarında değiştirilmesini içeren saçtırmanın bir çeşididir. RF saçtırmada ince film kaplaması yapılacak olan katot (hedef) ve bir anod, aralarında bir blokaj kapasitörü ile seri olarak bağlanır. Kondansatör, RF kaynağından plazma deşarjına güç aktarımı sağlayan empedans uyumlu bir ağıncı parçasıdır [157].

Şekil 2.20’de görülen saçtırma tekniğinde kullanılan soygaz iyonları, hedef malzeme yüzeyine çarparak sahip oldukları enerjiyi malzemeye verir ve böylece malzeme yüzeyinden atomları saçtır.



Şekil 2.20. a) Saçtırma tekniği şematik gösterimi, b) atomların/iyonların saçılması [129]

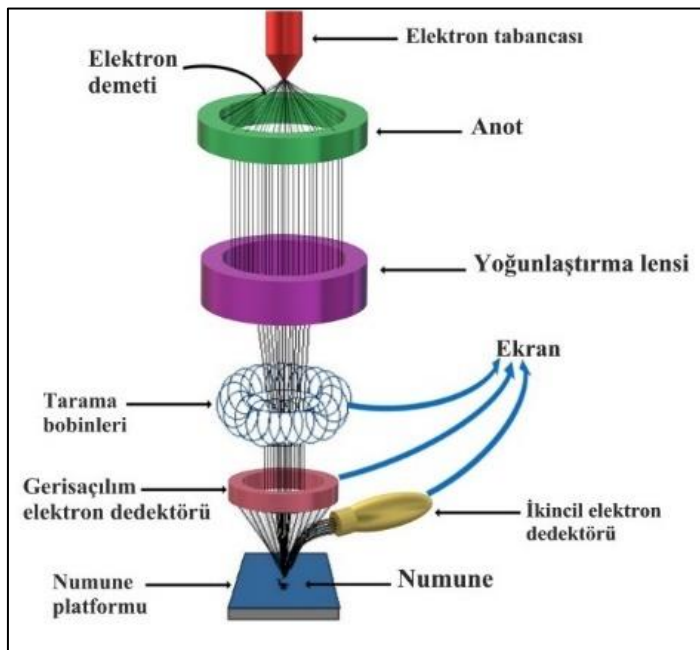
Saçtırma tekniği ile birçok malzeme başarılı bir şekilde kaplanmasına rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması ve altlık sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanılmasını sınırlamaktadır. Son yıllarda saçtırma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu, manyetik alanda yapılmıştır. Bunun nedeni, manyetik alanda saçtırma tekniği ile yapılan kaplamaların, mikroelettronik, optik, manyetik ve optik diskler ve kesici takımlar gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmasıdır. Saçtırma tekniğinin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesidir. Tekniğin dezavantajları ise limitli kaplama kalınlığı ve maliyeti sayılabilir. Çünkü saçtırma tekniğindeki elektrik tüketimi buharlaşmaya nazaran çok daha fazladır [129].

2.2.3. İnce film karakterizasyonu

Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope-SEM)

Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope-SEM), bir örneğin büyütülmüş görüntüsünü oluşturmak için odaklanmış bir elektron demeti kullanımına dayanır (Şekil 2.21). Elektron ışını numunenin yüzeyi boyunca düzenli bir şekilde yüzeyde taranır ve numuneden çıkan elektronlar görüntüyü oluşturmak için kullanılır. SEM’de, bir elektron tabancası tarafından üretilen, manyetik lensler tarafından numune yüzeyine odaklanan ve bir numunenin yüzeyi boyunca sistematik olarak taranan bir yüksek enerjili elektron demeti kullanılır. Işık mikroskopunda; ışık fotonları, cam mercekler tarafından odaklanır. Bir elektron mikroskopunda, elektronları odaklamak için elektromıknatıslar kullanılır. SEM’ler bir nesneyi yaklaşık 10 kattan 300.000 kata kadar büyütebilir. SEM görüntüsünde genellikle bir ölçek çubuğu bulunur. Ölçek çubuğu, görüntüdeki özelliklerin boyutlarını hesaplamak için kullanılır.

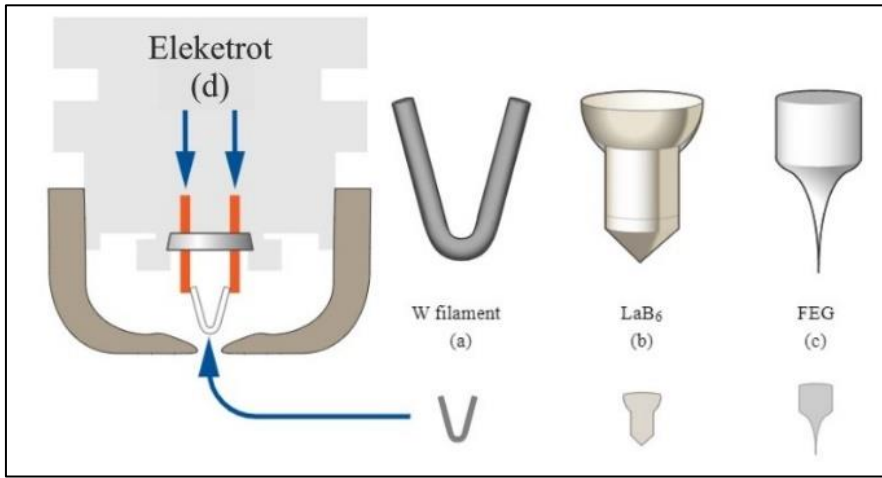
SEM görüntülerinin rengi yoktur (ancak yapay olarak renkli olabilir), malzemeye bağlı olarak üç boyutlu görünebilirler (alan derinliği nedeniyle) ve yalnızca numunenin yüzeyini gösterir (elektron ışınının numuneye minimum nüfuz etmesi nedeniyle). Görüntüde kontrast oluşturmak için, ışın-numune etkileşiminden gelen sinyal yoğunluğu, numune yüzeyi boyunca noktadan noktaya ölçülmelidir. Numuneden üretilen sinyaller bir elektron dedektörü tarafından toplanır, bir sintilatör vasıtasıyla fotonlara dönüştürülür, bir fotoçoğaltıcıda yükseltilir, elektrik sinyallerine dönüştürülür ve görüntüleme ekranındaki görüntünün yoğunluğunu modüle etmek için kullanılır.



Şekil 2.21. SEM bileşenleri [158]

Elektron tabancası, bir elektron demeti oluşturan SEM'in üst bölgesini ifade eder. En basit ve en ucuz tabanca olarak elektron üretmek için ısıtılmış bir tungsten tel kullanır. Başka kristal çeşitleri de vardır (lantan hekzaborid: LaB6) ancak onlar daha pahalıdır. Kristaller ya ısıtılır ya da büyük bir elektrik potansiyeli kullanılır. Elektron tabancası bir elektron kaynağı üretir (yani atomdan kopmuş serbest elektronlardan oluşur) ve bu elektronları tipik olarak 1-40 kV enerji aralığında hızlandırır. Geleneksel elektron tabancasının (triyot) üç bileşeni vardır; bir sıcak tel (filaman veya katot (-) veya elektron yayıcı olarak adlandırılır), bir Wehnelt (ızgara) kapağı ve bir anot (+). Termal emisyonlu bir filamentte, tungsten filament, bir filament akımı ile ısıtılır. Bu, termal elektronların emisyonuyla sonuçlanır. Yayılan elektronlar, malzemenin iş fonksiyonu enerjisinden daha büyüktür.

Diyagramda filaman (yayıcı olarak da adlandırılır), filaman düzeneğinin üzerine kapanan ve merkezinde elektronların çıktığı küçük bir deliğe sahip olan Wehnelt silindiri ile çevrilidir. Elektrot pimleri, bir yalıtkan disk aracılığıyla filamana gider ve akımı filamana taşır. Şekil 2.22 üç filament tipini göstermektedir: a) bir tungsten (W) teli, b) bir lantan hekzaborit kristal takımı: LaB₆ ve c) bir tungsten kristali (alan emisyon tabancaları için: FEG'ler). Bir tungsten tel filamentin ucunun çapı yaklaşık 10 µm iken, tungsten kristali çok daha dar bir uca sahiptir.



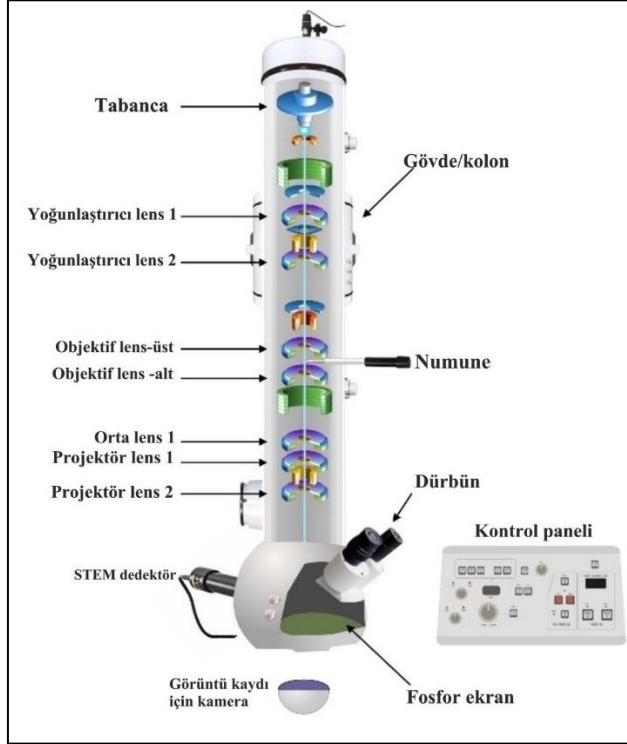
Şekil 2.22. Elektron tabancası [158]

Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope-TEM)

Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope-TEM) çok ince bir örnek içinden geçirilen yüksek enerjili elektronların görüntülenmesi prensibine dayanır. Elektronların örnek ile etkileşimleri sonucu oluşan görüntü büyütülür ve floresans ekran, fotoğrafik film katmanı ya da bir sensör üzerine odaklanır. Numuneden iletilen elektronlar, bir görüntü oluşturmak için algılanır. Bir TEM kullanarak, kristal örneklerde bulunan atomların dizilişi ve hücrelerin içindeki moleküler yapıları görebiliriz. Mikrouzay (10^{-6} m) ve nanouzay (10^{-9} m) boyutundaki numunelerin görselleştirilmesini ve analizini sağlar.

TEM, odaklanmış bir yüksek enerjili elektron demeti kullanıldığı için ayrıntı ve karmaşıklık seviyelerini ortaya çıkarır. Yüksek çözünürlüklü ve yüksek büyütme görüntüleme yoluyla ayrıntılı mikro yapısal incelemeye olanak tanır. Dokuların, hücrelerin, hücre altı yapıların, proteinlerin, kristal ve kompozit malzemelerin

araştırılmasını sağlar. Ayrıca, en hafif elementler dışında hepsini içeren numunelerin kristal fazlarının yönelimleri ve elementel bileşimleri hakkında bilgi sağlayabilir.



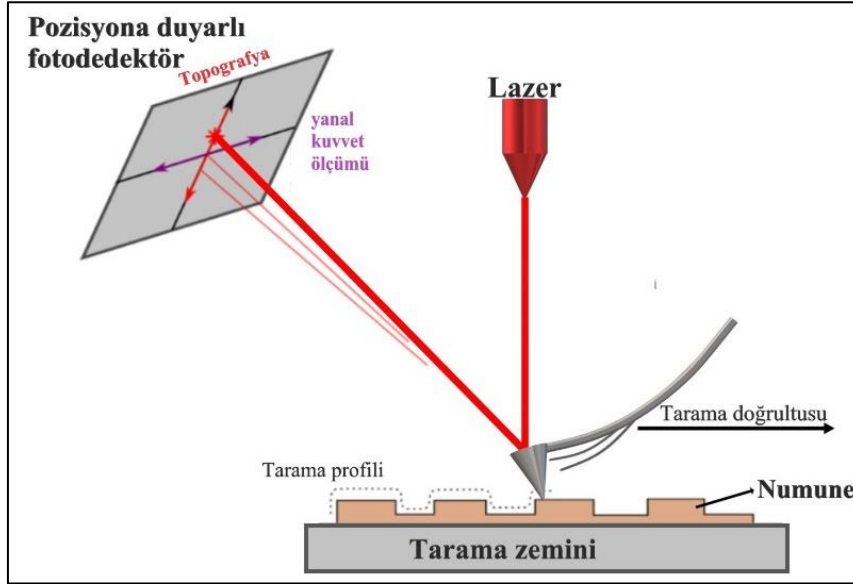
Şekil 2.23. TEM cihazının bileşenleri [159]

Numuneden geçerken elektronları, malzemenin bazı kısımları diğer kısımlardan daha fazla durdurur veya saptırır. Elektronlar, örneğin alt kısmında fosforlu bir ekrana toplanır veya bir kamera aracılığıyla toplanır. Elektronların numuneden geçmediği bölgelerde görüntü karanlıktır, saçılmamış olduğu yerlerde, görüntü daha parlaktır ve elektronların numune ile etkileşme ve numune tarafından saçılma şekline bağlı olarak arada kalan kısımlar gridir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscope-AFM)

AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), orijinal olarak nanometre ölçekli yarıiletken cihazların karakterizasyonu için geliştirilmiş analitik bir araçtır. Benzersiz analitik yetenekleri nedeniyle biyolojik ve biyofiziksel araştırmalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır [160]. Binnig ve diğerleri tarafından 1986'da icat edildiğinden beri AFM, nano ölçekli bilim ve teknolojiye çok önemli bir rol oynamıştır. AFM, bir manivela ucuna bağlı birkaç atom ve bir numune arasındaki çekici ve itici etkileşim kuvvetlerini

kullanarak bir yüzey topografyasını görüntüleyen mikroskobik bir tekniktir. Şekil 2.24, AFM'nin çalışma prensibini şematik olarak belirten bileşenleri göstermektedir.



Şekil 2.24. AFM'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi [160-162]

Çekici kuvvetler durumunda, AFM'ye neden olan üç ana katkı vardır. Bunlar kısa menzilli kimyasal kuvvet, VdW ve elektrostatik kuvvettir. Bu kuvvetlerin etkili menzilleri farklı olduğundan, mesafeye bağlı olarak bunlardan biri baskındır. Atomik kuvvet, statik AFM olarak adlandırılan bir tip-örnek etkileşim kuvvetinin neden olduğu manivela bükülmesi ile tespit edilebilir. Ayrıca, dinamik AFM olarak adlandırılan bir manivelanın rezonans özellikleri kullanılarak atomik kuvvet tespit edilebilir. Rezonans durumunda, manivelanın frekansı, genliği veya fazı etkileşim kuvveti tarafından değiştirilecektir. Kuvvet, statik AFM'de tahmin edilebilirken, dinamik AFM için ölçülen genlik, faz veya frekans verilerinden kuvveti değerlendirmek için karmaşık formalizm gerektirir. Ultra yüksek çözünürlüklü görüntüleme için son zamanlarda geliştirilen teknikler, örneğin düşük sıcaklık, ultra yüksek vakum ortamları ve sert bir manivela ile kolaylaştırılarak atom altı özelliklerini ortaya çıkarır [160-162].

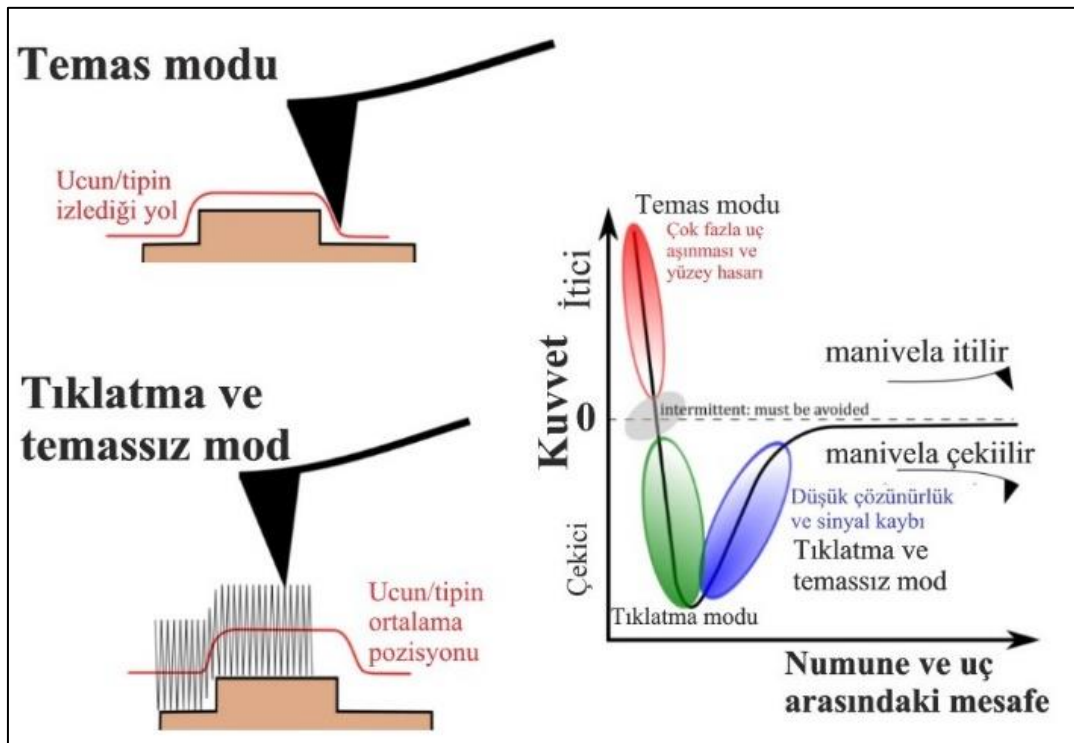
Atomik Kuvvet Mikroskobu, yüzey boyunca çok keskin bir ucun(tip) çok yakın mesafeden taranmasına veya hatta ona dokunulmasına dayanır. Tip, manivela adı verilen, genellikle metal kaplı Si olan ince, esnek bir şerit üzerine "oturur". Manivelanın arkası lazer ışığı ile aydınlatılır ve yansıma, konuma duyarlı bir dedektör (position sensitive detector-PSD) üzerinde gözlemlenir. Işık yolunun büyük bir kolu nedeniyle, manivelanın en küçük

kıvrımları bile dedektör üzerinde ölçülebilir bir yansıma hareketi ile sonuçlanır. Numuneyi manivelaya karşı yanal olarak tarayarak ve yansıyan ışığın PSD üzerindeki ilgili yer değiştirmesini izleyerek, numunenin bir yükseklik haritası veya topografisi elde edilir [161].

AFM, tip ve numune arasındaki etkileşime dayalı olarak üç modda gerçekleştirilebilir:

1. Temas Modu
2. Temassız Mod
3. Dinamik temas modu

Temas modunda tip, numune ile temas halinde olan numunenin yüzeyi boyunca sürüklenir. Tip ve örnek arasındaki mesafe birkaç 10 nm seviyesindedir. Lazer ışınının konuma duyarlı fotodedektör üzerindeki yer değiştirmesi, tip üzerine etki eden kuvvetle orantılı olduğu için, yerel özellik yüksekliğine göre her defasında yeniden hesaplanabilir. Manivela üzerinde geri besleme döngüsü yoktur ve bu mod, katı numuneler ve nispeten düşük yükseklik varyasyonları durumunda yüksek hassasiyetle en hızlı taramayı sağlar [161].



Şekil 2.25. AFM çalışma prensibine göre çeşitleri [161]

Temas modunun dezavantajları şunlardır:

- Uzun hızlı aşınması,
- Yüzeye zarar vermesi,
- Önemli yükseklik varyasyonu durumunda doğrusal olmayan yanıt, hatalı okumalara veya manivelenin kırılmasına neden olabilir.

Temassız modda tip, manivelenin rezonans frekansına yakın küçük bir genlikte, yüzeyin üzerinde serbestçe salınır. Tip asla yüzeye doğrudan temas halinde olmaz, ancak tarama sırasında, örneğin bir basamakta veya tümsekte yüzeye yaklaştıkça, uzun menzilli çekim kuvvetleri (çoğunlukla VdW-kuvvetleri) genliğe ve salınımların değişimine bağlı olarak değişir. Bu, PSD'den gelen sinyali izleyen bir işlemci tarafından algılanabilir. Daha sonra bir geri besleme döngüsü, salınımların genliği/fazı önceden ayarlanmış değerlere geri dönecek şekilde tipin konumunu ayarlar. Tip dikey pozisyonunun değişimi, numune üzerindeki yükseklik değişimi ile orantılıdır. Lazer yansıması ortalama olarak her zaman PSD'nin merkezinde kalır. Temassız modun avantajları, numunede olası minimum hasar olması (örneğin canlı hücreler taranabilir) ve manivelenin uzun ömürlü olmasıdır [161].

Temassız modun dezavantajları:

- Düşük sinyal/gürültü oranı
- Yavaş tarama
- Mekanik gürültüye vb. duyarlı olması
- Daha kötü çözünürlük

Son olarak, en iyi şekilde dokunma modu olarak bilinen dinamik bir temas modu, yukarıda bahsedilen görüntüleme modlarının avantajlarını birleştirir. Burada tip ayrıca tipik olarak daha büyük genliklerle, ancak rezonans frekansına yakın bir şekilde salınır. Her salınım döngüsünün sonunda ucun yüzeye dokunmasına veya tıklamasına izin verir. Bu nedenle adı temas modudur. Geri besleme döngüsü, salınım genliğini veya fazını sabit tutmak için numunenin üzerindeki tipin konumunu ayarlar. Dinamik bir temas modunun avantajları şunlardır: yüksek çözünürlük ve numuneye nispeten düşük hasar, tipin uzun ömrü ve tip yanıtının en büyük dinamik aralığı. Dezavantajları, temas modundan daha yavaş tarama

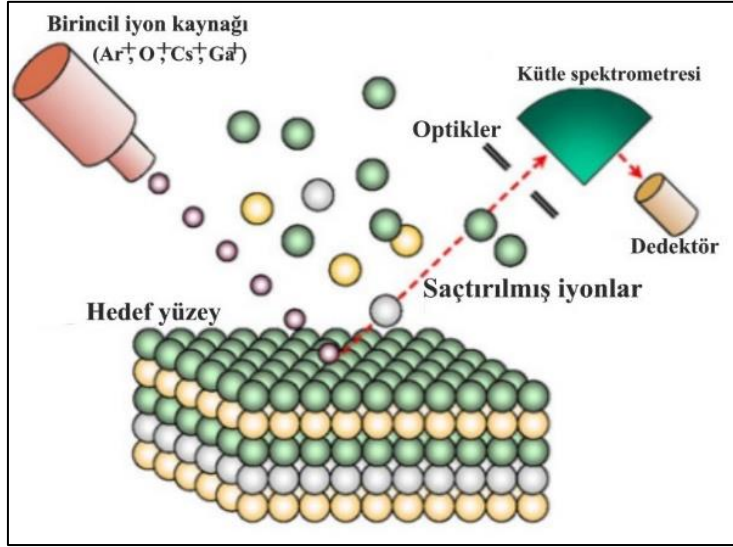
hızına sahip olması ve yumuşak madde numuneleri için dokunma olduğundan numunede hasara yol açmasıdır [161].

İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (Secondary Ion Mass Spectrometry-SIMS)

İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (Secondary Ion Mass Spectrometry-SIMS), ikincil iyon kütle spektrometresi ilkesine göre çalışan bir analitik cihazdır. Bir numunenin elemental ve izotopik bileşiminin nano ölçekli çözünürlük ölçümlerini elde etmek için kullanılır.

SIMS’de, birincil iyon demeti üretmek için bir iyon kaynağı kullanır. Bu birincil iyonlar numune yüzeyini aşındırır ve atomik çarpışmalara neden olur. Bu çarpışmaların bazıları ikincil iyon parçacıklarının salınmasına neden olur. Bu iyonlar, kütlelerin ölçüldüğü ve tanımlandığı bir kütle spektrometresi aracılığıyla iletilir. Birincil iyon ışını ile numune yüzeyi boyunca taranarak rasterleştirilir (noktasal piksel haline getirilir) ve her pikselden kaynaklanan iyonların sayısı en iyi 50 nm çözünürlükte, 10-50 kat daha fazla sayılarak element ve izotop dağılımının bir haritası oluşturulur [163, 164]. Bu, bir lens düzeneği kullanılarak birincil iyon demetinin numunenin yakınına konumlandırılmasıyla elde edilir [163]. Birincil iyon ışını, aynı lens düzeneğinden geri çekilen ikincil iyonlarla numune yüzeyine 90°’de çarpar. Bu, tek tek hücrelerin izotopik bileşiminin milyonda parça (ppm) veya milyarda parça (ppb) aralığında ayırt edilmesini sağlar [165].

Şekil 2.26, tekniğin şematik temsilini göstermektedir. Bu teknikte, birincil ışın, bombardıman iyonlarının yoğunluğu, kütlesi ve enerjisi; numunenin kendisinin fiziksel ve kimyasal özellikleri tarafından belirlenen bir oranda numunenin atomik katmanlarını kaldırır. SIMS, mükemmel hassasiyeti, niceleme doğruluğu ve derinlik çözünürlüğü nedeniyle yarıiletken topluluğu içindeki birçok malzeme çalışmasında temel bir karakterizasyon haline gelmiştir. Son yıllardaki uygulama alanı, tek bir matriste basit, nispeten derin katkılı profil oluşturmada, karmaşık yapılarda bulunan ve altına gömülü (ultra ince) metalik filmlerin (kapı veya silisit olarak kullanılan malzeme) çok sığ (<10 nm) profillerin analizine doğru genişlemiştir. Bu değişiklikler, çok yüksek derinlik çözünürlüğüne sahip SIMS talebini önemli ölçüde artırmıştır [166]. Ayrıca, bu yapılar içindeki malzeme etkileşimlerini incelemek için kullanılmaya başlanmıştır [165].



Şekil 2.26. SIMS'in şematik gösterimi [165]

2.3. Schottky Yapılar

Son 70 yılda modern yarıiletken cihazların ortaya çıkmasıyla birlikte elektronik cihazlarda büyük ölçüde devrim meydana gelmiştir [167]. Bu cihazlar, yarıiletken malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak; farklı elektronik altyapı ve işletim ortamları kullanılarak foton, elektron ve deşiklerin etkileşimine ve düzenlenmesine izin veren elektronik ve optik özelliklerin entegrasyonunu içerir. Çoğu çalışma, MS'nin modern elektronik bileşenlerin ana bileşeni olduğunu doğrulamaktadır [168, 169]. İlk olarak, metal-yarıiletken katı hal cihazı 1874'te keşfedilmiştir ve bir kurşun sülfür kristali üzerine preslenmiş bir tel ucu içeren kontak, doğrultucu olarak adlandırılmıştır. O zamandan beri, bu cihazlar düşük maliyetleri, yüksek hassasiyetleri ve basitlikleri nedeniyle büyük ilgi görmeye devam etmiştir [168].

Schottky bariyeri olarak bilinen doğrultucu metal yarıiletken (MS) kontak modelini ilk defa W. Schottky önermiştir. 1931 yılında Wilson'un, bant teorisinden yola çıkarak formüle dönüştürdüğü yarıiletkenlerin taşıma teorisi metal yarıiletken kontaklar için kullanılmıştır. Schottky ve Mott, bariyer yüksekliği ve şeklini açıklamak için engel oluşum mekanizması üzerinde çalışmalar yapmıştır. Mott, metal yarıiletken kontaklar için önceki çalışmalardan daha uygun bir model geliştirirken, Schottky (doğrultucu) potansiyel bariyerin, yalnızca yarıiletkende bulunan sabit alan yüklerinden dolayı meydana gelebileceğini ortaya atmıştır. Schottky bariyer kontaklarının anlaşılması için birkaç önemli gelişme olmuştur. Bunlardan birincisi; metal ve yarıiletken arasında bulunan

arayüzeyde potansiyel bir engelin var olduğunun ileri sürülmesi; metal yarıiletken kontağın doğrultucu yöndeki etkisini anlayabilmek için kaydadeğer bir çalışmadır. Diğer, bariyer üzerinde akımın iletimini açıklamak için Termiyonik Emisyon (TE) teorisidir [170-175].

Düşük ön gerilimlerde çalışan ve çok hızlı anahtarlama kabiliyetine sahip olan Schottky yapılar elektronik teknolojisinde önemli bir yer edinmiştir. Yüksek frekanslarda çalışarak iletkenlik ile yalıtkanlık durumları arasındaki geçişlere (hızlı anahtarlama) hızlı cevap verebilmesi gibi önemli avantajları sayesinde metal ile yarıiletkenin sıkı kontak edilmesiyle oluşturulan Schottky yapıların üretimi ve kullanımı yarıiletken endüstrisinde hızla yaygınlaşmıştır [175].

Bir metal ve bir yarıiletken arasındaki yakın temasa dayanan iki çeşit ideal cihaz vardır: omik bağlantı veya doğrultucu (Schottky olarak da adlandırılır) bağlantı. Omik bağlantılar genellikle yüksek katkılı yarıiletkenlerle oluşturulur [7]. İyi bir omik kontak ve yüksek hızlı yarıiletken cihazlar için düşük temas direnci gereklidir. Buna karşılık, ideal bir Schottky eklemi, yüksek akımın yalnızca ileri yönde aktığı ve zıt yönde sonsuz direnç sunduğu ideal bir diyot gibi davranır [176]. Bağlantı tipi, farklı metaller ve yarıiletkenin doping seviyesi ayarlanarak değiştirilebilir [177]. İdeal bir omik bağlantıda, akım (I) uygulanan voltaj (V) ile doğrusal olarak değişir ve V/I oranı, kontak (R_c) ve seri (R_s) direncin birleşimidir [7].

$$\frac{V}{I} = R_c + R_s \quad (2.3)$$

R_s , bağlantıdaki iki malzemesinin toplam direncidir. Kontak direnci ne kadar düşükse, omik kontağın kalitesi o kadar iyi olur. Düşük R_c 'li omik bağlantılar, yüksek hızlı yarıiletken cihazların performansı için kritik öneme sahiptir. Buna karşılık, ideal Schottky bağlantıları, bir yönde yüksek akım ve çok düşük kontak direnci ((diyotun "açık" durumuna karşılık gelen ileri yön olarak adlandırılır) ve zıt yönde (ters yön veya "kapalı" durum)) ihmal edilebilir akım veya sonsuz direnç ile mükemmel bir diyot görevi görür. Schottky bağlantıları genellikle hafif katkılı yarıiletkenlerle oluşturulur [7].

Arayüzey tabaka olarak metal ile yarıiletkenin arasında, ferroelektrik kullanılırsa metal-ferroelektrik-yarıiletken veya metal-ferroelektrik/yalıtkan-yarıiletken (MFS/MFIS) yapılar [178], polimer kullanıldığında metal-polimer-yarıiletken (MPS) [179], yalıtkan tabaka

kullanıldığında metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), oksit tabaka kullanıldığında metal-oksit yarıiletken (MOS) [180] ve metal-yarıiletken (MESFET)/metal-oksit-yarıiletken (MOSFET) alan etkili transistörler oluşturulur. Yarıiletken ile metal arasına büyütülen polimer, yalıtkan, ferro-elektrik gibi ince bir tabaka, yük geçişini düzenlediği gibi metali yarıiletkenden izole eder. MS yapılar yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini oluşturur ve bu alandaki elektronik cihazların daha iyi anlaşılmasını sağlar [175].

Genel olarak, metal oksit/yalıtkan yarıiletken (MOS/MIS) yapısı, bir metal ile bir yarıiletken arasına yalıtkan tabaka yerleştirilerek elde edilir [181]. MOS yapısında bir oksit tabaka, metali ve yarıiletkeni birbirinden ayırır. Örneğin, metal/yalıtkan arayüzlerinde, yarıiletkenin bant aralığında bulunan enerjilerle yüzey durumlarının sürekli bir dağılımı vardır [182]. Ara oksit tabakası, metalin yarıiletkene difüzyonunu önlemeye yardımcı olur, aynı zamanda MIS Schottky diyotlarındaki elektrik alanı azalmasını da yavaşlatır. Arayüz katmanı, cihaz özelliklerini, performansını ve kararlılığını belirlemeye yardımcı olur [183].

2.3.1. Metal yarıiletken (metal/semiconductor) MS yapı

MS bağlantıları, bir yarıiletken levhanın temizlenmiş yüzeyi üzerine bir metalin büyütülmesi ile elde edilir. Gerçek MS bağlantıları ne tam olarak omik ne de kusursuz doğrultucudur. İki ideal durumdan birinin iyi bir yaklaşımı, metal ve yarıiletken malzemelerin uygun seçimiyle ve imalat sürecinde gereken özenle elde edilebilir. Schottky diyotlar, güneş pilleri, fotodedektörler, transistörler, MESFET'ler, yüksek elektron taşıyıcı transistörler (high-electron-mobility transistors (HEMT))'ler, mikrodalga karıştırıcılar, RF zayıflatıcılar, redresörler, varaktörler, zener diyotlar ve çeşitli entegre devreler gibi birçok uygulamada kullanılan önemli elektronik bileşenlerdir [7].

MS cihazlarının performansı ve kararlılığı yüzey koşullarına bağlıdır. Arayüz katmanının ve arayüz yüzey durumlarının eklenmesi, cihaz özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. İdealite faktörü bire yaklaşan bir MS Schottky diyotunun ideal davranışı için düşük seri direnç ve düşük ters kaçak akım gereklidir. Bununla birlikte, MS Schottky diyotlarının elektriksel özellikleri, arayüzey durumları, arayüzey oksit tabakası ve seri direnç gibi çeşitli ideal olmayan durumlar tarafından belirlenir. Metalin bir yarıiletken üzerinde doğrudan birikmesi, yarıiletken yüzeyinde birçok arayüzey durumu üretir. Daha yüksek arayüzey durum yoğunluğu, ideal olmayan akım-voltaj karakteristik davranışının bir

nedenidir. Yarıiletken yüzey üzerine bir oksit tabakası eklemenin en önemli etkisi, sarkan bağları pasifleştirmektir. Bu pasivasyon, yüzey durumlarını en aza indirerek diyot akım-voltaj karakteristik davranışındaki anormallikleri azaltabilir [184]. MS Schottky diyotu arasındaki oksit arayüzey tabakasının bir diğer önemli yönü, düşük bir kaçak akım elde etmektir. Yüksek güç, yüksek frekans ve yüksek sıcaklık uygulama cihazları için; MS bağlantıları, cihaz performansını, güvenilirliğini ve kararlılığını sınırlayan yüksek kaçak akım ve düşük voltajdan zarar görebilir. İnce bir oksit/yalıtkan tabakasının biriktiği yer, kaçak akımın engellenebildiği yerdir [185].

Doğru ön gerilim altında, MS ve arayüzey tabakalı MIS veya MPS ve MFS/MFIS gibi yarıiletken aygıtlar akımı iletirken, ters ön gerilim altında iken yarıiletken malzemeden dolayı az miktarda sızıntı akımı geçirirler. Diyotun iletme geçtiği voltaj değerinde, akımların oranı ters (I_R) ve doğru (I_F) ön gerilimler altında, diyot performansını belirten doğrultma oranını ($R_R=I_F/I_R$) verir. Bu oranın ideal bir Schottky diyotta $\geq 10^{10}$ olması beklenir [170, 175]. Bu oran göz önünde bulundurularak, MS/MIS yapılar oluşturulurken, yarıiletken ve metal arasında potansiyel engel meydana gelmesi için yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak uygun iş fonksiyonu olan metaller seçmek gerekir. Doğrultucu ön kontak ve Schottky kontaklarda genellikle saflık derecesi yüksek alüminyum (Al), altın (Au) ve gümüş (Ag) kullanılır. p-tipi yarıiletkenlerde doğrultucu kontak için; yarıiletkenin iş fonksiyonu (ϕ_s) metalin iş fonksiyonundan (ϕ_m) büyük ($\phi_s > \phi_m$) olmalıdır. Omik kontak için p-tipi yarıiletkenlerde bu koşul $\phi_m > \phi_s$ 'dir. n- tipi yarıiletkenlerde ise bu koşullar tam tersidir; doğrultucu kontak için $\phi_m > \phi_s$, omik kontak için ise $\phi_s > \phi_m$ 'dir [170, 175]. ϕ_m , bir elektronu metalden ayırmak için gerekli olan iştir. Kısaca iş fonksiyonu, bir elektronun Fermi enerji seviyesinden uzay seviyesine geçmesi için ihtiyaç duyulan enerji miktarıdır.

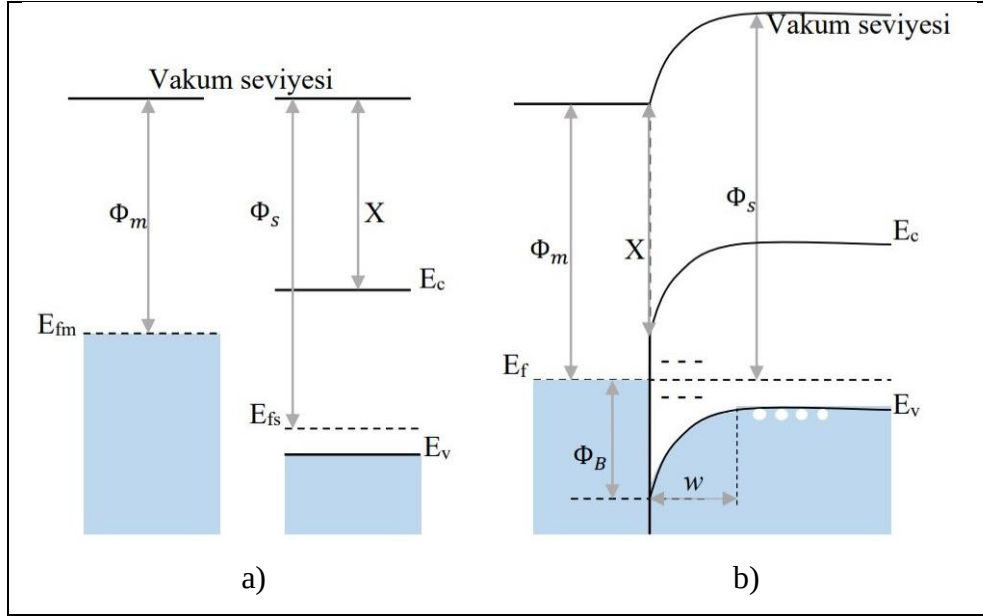
Çizelge 2.4. Kontak çeşitlerine göre iş fonksiyonları koşulları

	Doğrultucu Kontak	Omik Kontak
p-tipi	$\phi_s > \phi_m$	$\phi_m > \phi_s$
n-tipi	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_s > \phi_m$

Metal p-tipi Schottky kontaklarda yarıiletken tarafı negatif ise kontak ters beslem; pozitif ise doğru beslemdir. Bu durum metal n-tipi Schottky kontaklarda tam tersidir [7].

Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ($\phi_s > \phi_m$)

Şekil 2.27 a)'da gösterildiği gibi kontak oluşmadan önce metalin iş fonksiyonu (ϕ_m) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) küçüktür. Şekil 2.27 b)'de metal ve yarıiletken temas halinde iken, elektronlar metalden yarıiletkene akar ve iki taraftaki Fermi seviyesi hizalanır. Bu elektronlar, p-tipi yarıiletkende azınlık taşıyıcılarıdır.



Şekil 2.27. p-tipi yarıiletken üzerindeki metal kontakın elektron enerji bant diyagramı $\phi_m < \phi_s$ a) henüz eklem oluşmamış metal, b) yarıiletken enerji bant diyagramı ve c) eklem oluşuktan sonra p-tipi yarıiletken ile metalin temas halindeki enerji diyagramı [7]

Şekil 2.27 a)'da henüz birbirine temas etmemiş haldeki metal ve yarıiletken gösterilmektedir. X , yarıiletkenin elektron ilgisidir ve uzay bandı ile iletkenlik bandı (E_c) arasındaki farka eşittir. c) Metal ve p-tipi yarıiletken eklemi oluşuktan sonra oluşan termal durumdur. Şekil 2.27'de E_f Fermi seviyesidir. E_{fs} , mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K) bir metalde elektronların doldurduğu en yüksek dolu enerji seviyesidir. Bir malzemede iş fonksiyonu, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Fermi seviyesi yarıiletken (E_{fs}) ve metalin (E_{fm}) seviyeleri eşitlenerek değerlik bandı (E_v), E_c ve E_{fs} seviyeleri gösterilmektedir. Boş dairelerdeşikleri temsil etmektedir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu metalinkinden daha büyüktür ($\phi_m < \phi_s$) ve E_{fs} , p-tipi katkılama nedeniyle E_v 'ye daha yakındır. Yarıiletken ve metalin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanan

vakumlar arasındaki fark, bantların bükülme miktarına eşittir. Φ_B , Schottky bariyer yüksekliği (SBH) olarak adlandırılır ve Φ_m ve X 'e bağlıdır [7].

Elektronlar yarıiletkenine ulaştıktan sonra, Şekil 2.27 b)'de gösterildiği gibi iyonize alıcılardan oluşan bir uzay yükü katmanına yol açandeşiklerle/deliklerle yeniden birleşirler. Uzay yükü bölgesindekideşiklerin konsantrasyonu, elektron konsantrasyonuna kıyasla ihmal edilecek kadar küçük kalır. Bu nedenle, temas bölgesinin yarıiletken tarafında, uzay yükü bölgesinin kalınlığı w iyonize alıcı atomların konsantrasyonuna bağlı olan bir tükenme tabakası oluşur. Bir p-tipi yarıiletkenindeki akımdeşikler tarafından taşındığından, Şekil 2.27'deki bant diyagramındadeşikler için bariyer tabakası vardır. Şekil 2.27 b)'de görüldüğü gibi,deşikler için engel yüksekliği ϕ_b , E_g 'nin yarıiletkenin bant aralığını temsil ettiği ilişki ile verilir. Şekil 2.27'dekilere benzer değerlendirmeler kullanılarak, $\phi_m > \phi_c$ ise metal-p-tipi bir yarıiletken kontakın doğrultucu olmadığı görülebilir [171].

$$\Phi_B = |\Phi_M - X| \quad (2.4)$$

Bir metal yarıiletken bağlantının p-tipi alttaş üzerindeki Schottky/Mott ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Phi_B = E_g - |\Phi_M - X| \quad (2.5)$$

Burada $E_g = E_c - E_v$ yarıiletkenin bant aralığıdır. Denklem 8 ve 9'a bağlı olarak, n ve p katkılı bir yarıiletken üzerindeki belirli bir metalin, elektronları vedeşikleri için SBH'leri toplamının bant aralığına eşit olması beklenir [7]:

$$\Phi_{B,n} + \Phi_{B,p} = E_g \quad (2.6)$$

Yarıiletken tarafındadeşikler için yüzey engeli E_s (2.7) ile verilmektedir.

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.7)$$

Burada V_i eklem yapının potansiyelidir. Bu durumda qV_i , metale yarıiletkenden gelen elektronların aşması gereken potansiyel bariyer yüksekliğidir. Diğer tarafta yani metal kısımda ise;

Termal uyarılmadan dolayı yarıiletkendekideşiklerin bir kısmı yüzey engelini aşarak metale geçerken, metaldeki bazı elektronlar da yine termal uyarılmadan dolayı yarıiletkene geçer. Her iki tarafa geçiş de eşit büyüklükte fakat zıt yönde I_0 akımına yol açar.

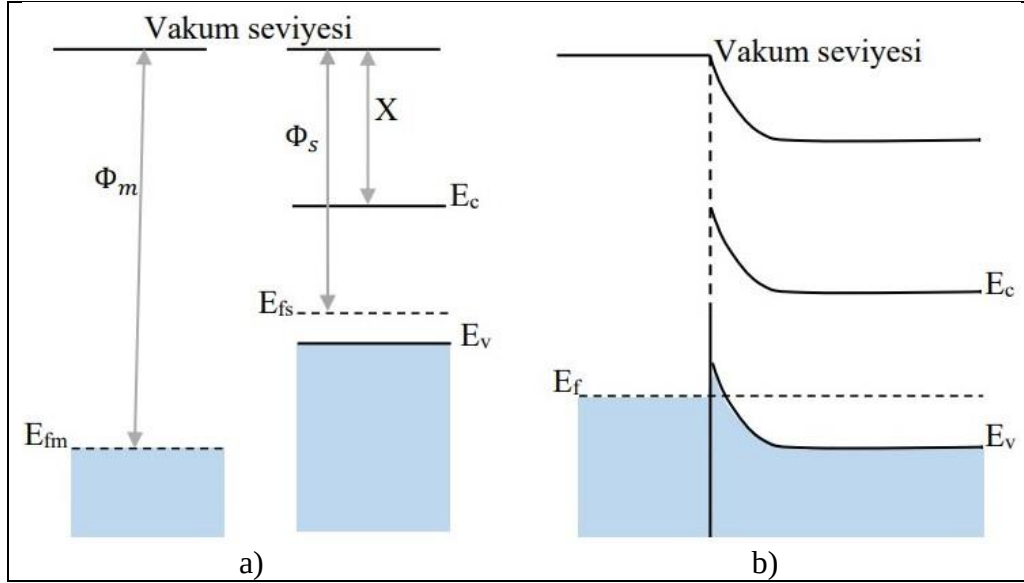
Kontak halindeki yapıya pozitif bir gerilim (V) uygulandığında, metalden yarıiletkene geçendeşikler değişmezken, yarıiletkenden metale geçendeşikler değişir. Bu durumda akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

İle ifade edilir. Ters doyma akımı I_0 , $\ln(I)$ -V grafiğinin $V=0$ 'da $\ln(I)$ 'yı kestiği noktadan elde edilir. T , k , q sırasıyla sıcaklık (Kelvin), Boltzmann sabiti ve elektron yüküdür [170, 186].

Metal/p-tipi yarıiletken omik kontak ($\phi_m \geq \phi_s$)

Şekil 2.28'da gösterildiği gibi kontak halinden önce metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür ve metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden düşüktür. Kontak halinde (Şekil 2.28 b) yük geçişi meydana gelir. Yarıiletkende bulunan elektronlar metal kısıma geçerek negatif bir yüzey yükü meydana getirir. Böylece yarıiletken kısımdadeşikler meydana gelir. Yarıiletken Fermi seviyesi iş fonksiyonları farkı kadar ($\phi_m - \phi_s$) düşer. Böylece p-tipi yarıiletkendedeşikler artar. Metalde bulunan elektronlar yarıiletkendekideşiklere kolay bir şekilde geçerken,deşikler de yarıiletkenden metale geçmektedir. Metale geçendeşikler, düşükdeşik konsantrasyonundan dolayı hemen nötrleşir. Ters beslem halinde iken, metaldeki (iletkenlik bandında)deşiklerin de yarıiletkene kolayca geçişi meydana gelir. Böylece her iki tarafa da geçişler kolayca olmaktadır, bu duruma omik kontak denir.



Şekil 2.28. p-tipi yarıiletken üzerindeki metal kontağın elektron enerji bant diyagramı $\Phi_m > \Phi_s$ a) henüz eklem oluşmamış metal, b) yarıiletken enerji bant diyagramı ve c) eklem oluşuktan sonra p-tipi yarıiletken ile metalin temas halindeki enerji diyagramı [7]

Metal iş fonksiyonu Φ_m ve Fermi enerjisi E_{fm} , yarıiletken iş fonksiyonu Φ_s . Tamamen hareketsiz iyonize vericilerden oluşan pozitif yük, yarıiletkenin içinde bir w mesafesi boyunca uzanır ve uzay yükü (veya tükenme) bölgesini oluştururken, metal/yarıiletken (M/S) bağlantısındaki enerji bantlarının bükülmüş kısmına karşılık gelir [187]. Gr ve Si arasına yüksek bir dielektrik tabaka koymanın etkisi de araştırılmıştır [21, 22]. Böylece, tabakanın hem yerleşik potansiyeli artırdığı hem de rekombinasyonu en aza indiren Si yüzeyi pasifleştirdiği sonucuna varılmıştır [25, 188].

2.3.2. Metal/oksit/yarıiletken (metal/oxide/semiconductor) MOS yapı

MOS cihazları, güçlü iyonizasyon radyasyon alanları ve yüksek sıcaklık atmosferleri ile zorlu atmosferik ortamlara dayanabilen uzay uygulamaları için vazgeçilmezdir. MOS yapısı, güneş pilleri, MOSFET'ler ve Schottky diyotları gibi elektronik cihazların zorunlu bir parçasıdır [19–21]. Alttaş seçimi, bir ara katman ve büyüme süreci, Schottky bariyer diyotlarının (SBD'ler) özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar.

MOS'un yapısı (MOS kondansatörü olarak da adlandırılır), bir metal ve bir yarıiletken arasında bir oksit malzemesinin sıkıştırıldığı basit kapasitörlerdir. Çeşitli uygulamalara

bağlı olarak, temel MOS yapısı, bir MOS Schottky diyotu, kapasitör veya MOSFET transistörlerinde bir kapı görevi görebilir [46].

Metal oksit-yarıiletken (MOS) yapıları, üzerine bir metal elektrot geçidinin yerleştirildiği bir oksit tabakası (50 ila 5000 Å kalınlığında) ile kaplanmış bir yarıiletken alt tabakadan oluşur. MOS yapıları, yalıtkan veya oksit katmanlarının dielektrik özelliği sayesinde elektrik yükünü depolayan bir tür kapasitör oluşturur [189].

Kalın yalıtkan tabakalı (≥ 50 Å) MOS yapılarında ara yüzey durumları yarıiletken ile dengede iken, ince (≤ 10 Å) yüzey durumları metal ile dengededir [190, 191]. Yalıtkan tabaka kalınlığı 50 Å 'dan az olduğunda, MOS yapılarında doğrudan tünelleme mümkün hale gelir [189].

2.3.3. Metal/yalıtkan/yarıiletken (metal/insulator/semiconductor) MIS yapı

Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapısı ile ilgili hem teorik hem de pratik araştırmalar göstermektedir ki; ince yalıtkan tabaka, sadece diyottan akan akımın büyüklüğünün değil, aynı zamanda bu akımın baskın tipinin (çoğunluk veya azınlık taşıyıcısı) kontrol edilmesini sağlar. Ya yalıtkan içinde ya da yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde bulunan uygun yük yakalama merkezlerini içeren çoğunluk taşıyıcı cihazlar için ve uygun yalıtkan kalınlıkları, metal iş fonksiyonları ve yarıiletken dirençleri kullanan küçük taşıyıcı cihazlar için arzu edilen şekilde düşük karanlık akım değerleri varsayılmıştır.

MIS yapısında, TE karanlık akımı, etkin metal yarıiletken bariyer yüksekliğini artırarak, çoğunluk taşıyıcı tünelleme olasılığını azaltarak ve arayüzey durumlarını artırarak azaltılabilir. Bu da çoğunluk taşıyıcıları için büyük bir yakalama kesiti ile veya yarıiletken yüzeyinde çoğunluk taşıyıcılarının sayısını azaltarak yapılabilir [192, 193].

Farklı kalınlıklarda yalıtkan malzeme kullanılarak oluşturulmuş MIS yapı çalışmaları vardır. Karabulut ve ark. [194], ALD tekniğiyle, MIS yapısını, kalınlığı yaklaşık 3, 5 ve 10 nm belirleyerek, Hafniyum dioksit (HfO_2) ara yüzey tabakalar oluşturmuşlardır. I-V karakteristiklerinden diyot potansiyel engel yüksekliğinin, HfO_2 tabaka kalınlığıyla arttığı gözlemlenmiştir. Altındal ve ark. [195] ise 50Å (5 nm) ve 820Å (82 nm) kalınlığında $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) yapısı oluşturarak arayüzey durumlarını incelemişlerdir. Mangal ve

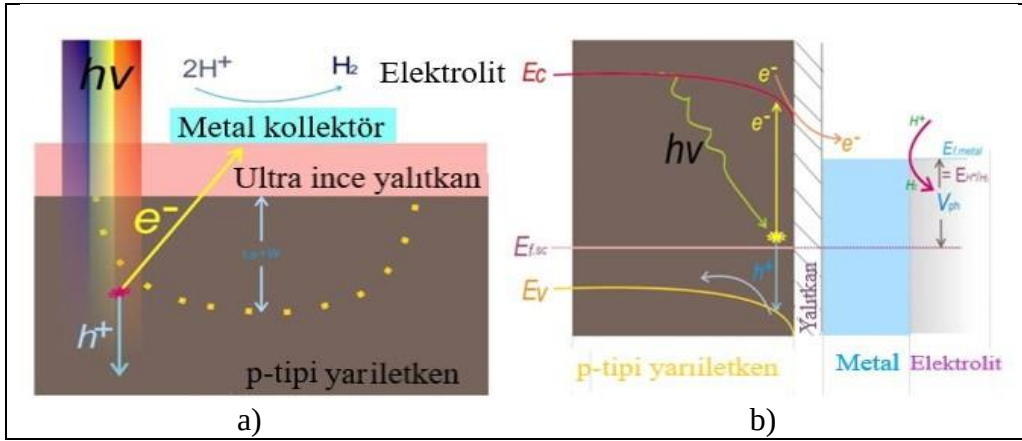
ark. 100-200 Å (10-20 nm) arasında farklı kalınlıklarda Aluminum/Polyaniline/GaAs MIS yapısı oluşturarak cihaz performansının tünelleme etkisini incelemişlerdir [196]. Arslan ve ark. [197] ise 80 nm kalınlığında yalıtkan tabakaya sahip (Au/Ni)/HfAlO₃/n-Si yarıiletken eklem yaparak akım taşıma özelliklerini incelemişlerdir.

MIS nanoeklem tasarımının en önemli özelliği, yarıiletken fotokatalizörlerin stabilite ve ışık toplama özelliklerinin ayrıştırılmasıdır. Bu özellik, güneş radyasyonunu emmek için çok uygun olan dar bir bant boşluğuna sahip yarıiletken fotokatalizörler yapılmasını sağlar. MIS nanoeklem yapısı içinde, tipik olarak bir metal-oksit tabakası olan ultra ince yalıtkan tabaka, yarıiletkenin aşındırıcı elektrolitten korunmasında oldukça kritiktir. Ultra ince yalıtkan tabaka MIS ekleminde, azınlık taşıyıcı mobilitesinin minimum rekombinasyonla verimli bir şekilde çalışmasında önemli bir rol oynar [198].

MIS nanoeklem yapısı başlangıçta Moll ve Garrett tarafından 1959'da voltaj kontrollü bir varistör (değişken kapasitör) olarak önerilmiştir [199]. Daha sonra, MIS'in özellikleri Frankl ve Lindner tarafından analiz edilmiştir [200]. İlk başarılı MIS nanoeklem yapısı Ligenza ve Spitzer tarafından Si yüzeyinde termal olarak büyütülen Si dioksit (SiO₂) ile yapılmıştır [201]. MIS tabanlı diyotların ışığa duyarlı cihazlar olarak ilk uygulaması güneş pilleridir. MIS nanoeklem yapısı içinde, saydam bir yalıtkan tabaka (yani Si Schottky bariyerli güneş hücrelerinde yaklaşık 20 Å SiO₂) kullanılarak enerji dönüşüm verimliliğinin artırılabilceği keşfedilmiştir [198]. İyi davranış sergileyen bir p-tipi MIS nano-eklemde, fotojenere edilmiş azınlık elektronları, Şekil 2.29 b)'de gösterildiği gibi, doğrudan yarıiletken, iletken bant kenarından (E_c) metalik toplayıcı ($E_{f,metal}$) Fermi seviyesine geçer. MIS tabanlı fotoelektrot tasarımının en önemli avantajı, yarıiletken kararlılığının ve ışık toplama verimliliğinin ayrıştırılmasıdır, bu da tipik olarak güneş radyasyonunun emilmesi için kullanılan daha dar bant aralıklı yarıiletkenlerin, korozyon sorunlarına neden olmadan yüksek pH elektrolitinde uygulanabilmesini sağlar. Bu, tipik olarak yarıiletkeni aşındırıcı elektrolitten koruyan ultra ince bir metal oksit tabakası olan MIS yapısındaki kritik yalıtkan tabaka ile sağlanır. Yalıtkan tabaka ayrıca, minimum rekombinasyon ile MIS nano-eklem boyunca azınlık taşıyıcı elektron taşınmasına verimli bir şekilde aracılık eder [198].

MIS tabanlı diyotun ardındaki fiziği anlamak için MIS yapısının bant diyagramını analiz etmek gerekir. Genel olarak, ters gerilim (tükenme tabakasına yol açan) yalıtkan katman ve

uzay yükü bölgesi arasında dağıtılmaktadır. Yarıiletken-yalıtkan arayüzü üzerindeki potansiyel bariyerin yüksekliği kısmen uygulanan öngerilimden oluşur ve (i) metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarındaki farklılıklar, (ii) arayüzey durumlarındaki yükler (iii) yerleşik yalıtkan yükü ve yarıiletken-yalıtkan arayüzü yakınında biriken azınlık taşıyıcıları tarafından belirlenir. MIS yapısına ters öngerilim uygulandığında, denge dışı tükenme bölgesi meydana gelir. Genel olarak, bir MIS nanoeklemi; yarıiletken, yalıtkan ve metalik toplayıcı olmak üzere üç parça içerir [198].



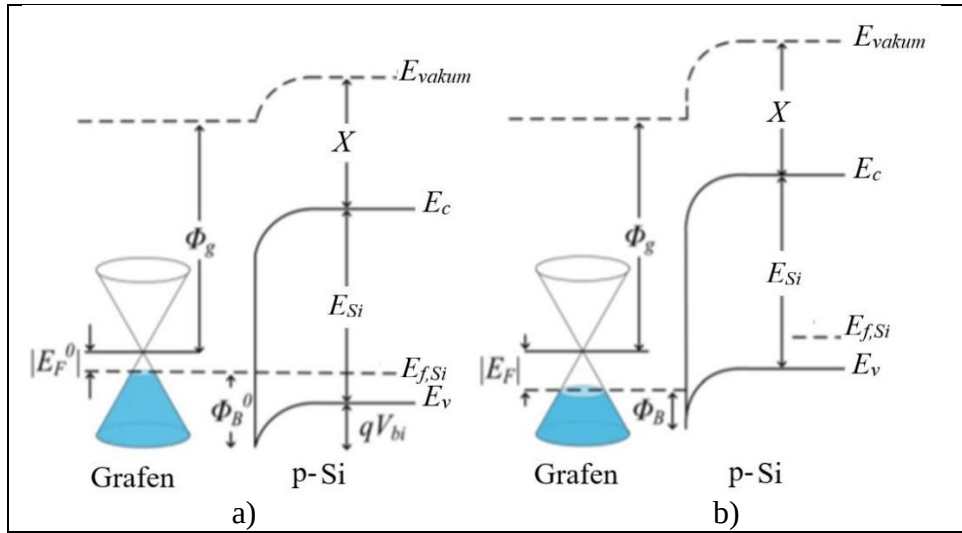
Şekil 2.29. MIS tabanlı fotoelektrot mekanizmasının geleneksel görünümü. a) Yalıtkan kaplı p-tipi yarıiletken üzerine yerleştirilmiş metalik toplayıcı MIS tabanlı fotoelektrotun şematik yandan görünüşü. b) p-tipi yarıiletkenli standart bir MIS nano-bağlantısı [198]

2.3.4. Grafen yarıiletken eklemler

Son on yılda Gr, benzersiz özelliklerinden dolayı en çok çalışılan malzemelerden biri olmuştur. İki boyutlu doğası, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle Gr, yeni nesil elektronik ve algılama cihazları için mevcut yarıiletken teknolojisi ile entegrasyon imkanı sunmaktadır. Bu bağlamda, Gr/S arayüzünün anlaşılması, çok yönlü bağımsız bir cihazın yanı sıra daha gelişmiş elektronik sistemlerin yapı taşı oluşturabilmesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Gr, 2004 yılında bilim camiasının dikkatine sunulduğundan beri, cihaz araştırmaları daha karmaşık Gr transistörlere odaklanırken, Gr/S eklemi ancak son zamanlarda sistematik araştırmaların konusu olmaya başlamıştır. Sonuç olarak, bu cihazın fiziğinin ve potansiyellerinin tam olarak anlaşılması hala eksiktir. Son birkaç yılda yapılan çalışmalar, Gr'in, doğrultucu özelliklere sahip olan ve mükemmel Schottky diyotlar gibi davranan 3D veya 2D yarıiletken malzemelerle bağlantılar oluşturabileceğini göstermiştir. Bu cihazlardaki yenilik, ayarlanabilir SBH'dir; bu özellik, Gr/yarıiletken birleşimini,

arayüz iletim mekanizmalarının incelenmesi ve ayrıca foto-algılama, yüksek hızlı iletişim, güneş pillerindeki uygulamalar için harika bir platform haline getirir [7].

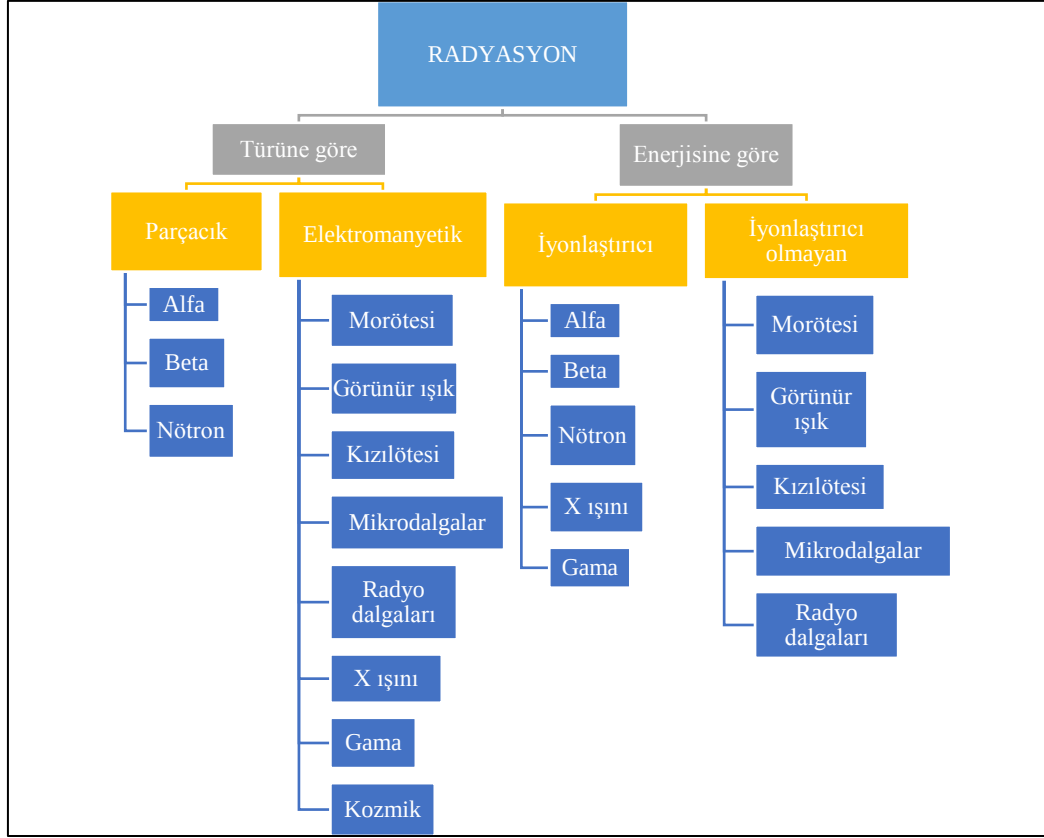
Şekil 2.30, Gr/p-Si Schottky bağlantısının (a) termal dengede ve (b) ters öngerilim V_R altında enerji bant diyagramıdır. E_{vac} vakum seviyesidir, χ , E_C , E_{Si} , $E_{F,Si}$ ve E_V , Si'nin sırasıyla elektron ilgisi, iletim bandı, bant aralığı, Fermi seviyesi ve değerlik bandıdır. Ayrıca, V_{bi} yerleşik voltajdır, Φ_g , Gr'in iş fonksiyonudur. E_F , Gr Fermi-seviye kaymasıdır ve Φ_B , SBH'dir. Şekil 2.30 a)'da "0", termal denge (yani sıfır sapma) değerlerini gösterir. Gr Fermi seviyesinin, ters öngerilim altında Dirac noktasına göre daha da aşağı kaydığını ve Φ_B 'yi azalttığını görmekteyiz [7, 187].



Şekil 2.30. Gr/p-Si Schottky bağlantısının (a) termal dengede ve (b) ters öngerilim enerji bant diyagramları [187]

2.4. Gama Işınımının Aygıt Performansına Etkileri

Radyasyon, radyoaktif bozunmaya uğramış kararsız atomlardan yayılan enerji, yüklü parçacıklar veya dalgalar şeklinde yayılan bir enerji çeşididir. Radyasyon Şekil 2.31'de gösterildiği gibi türüne göre parçacık ve elektromanyetik radyasyonu olarak ikiye ayrılır. Maddeyle etkileştiğinde ise maddeyi iyonlaştırma durumuna göre iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan olmak üzere ikiye ayrılır.



Şekil 2.31. Radyasyonun türüne ve enerjisine göre sınıflandırılması

Parçacık radyasyonları olan alfa, beta ve nötron belirli bir kütle ve enerjiye sahip olmakla birlikte alfa ve betanın yükü var iken nötron yüksüz bir parçacıktır. Dolayısıyla, kütsüz ve yüksüz parçacıklar olan fotonlar gibi (gama ve X ışınları), nötronun da madde ile etkileşiminde Coulomb etkisi gözlenmez. Gama radyasyonu, iyonlaştırıcı ve yüksek giriciliğe sahiptir.

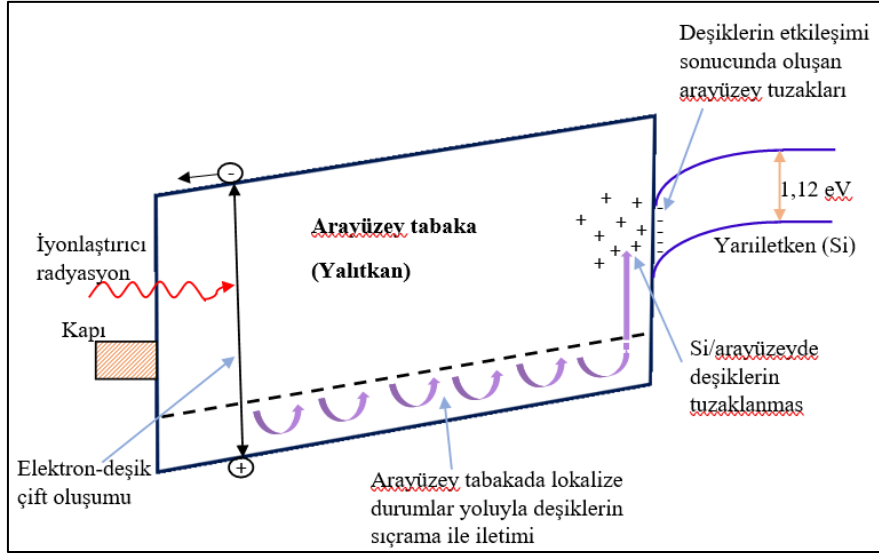
Gama radyasyonu gibi enerjileri 1 keV ile yüzlerce MeV aralığında olan elektron, nötron, proton ve alfa parçacığı gibi herhangi bir radyasyon yarıiletken cihazdan geçtiğinde farklı etkiler meydana gelebilir [202-206]. Yüksek enerjili radyasyon MS arayüze nüfuz eder ve arayüzün derinliklerinde hasara neden olur. Düşük enerjili radyasyon, cihazın yakın arayüzeyinde boşluklar ve kusurlar şeklinde ciddi kristal yapı hasarına neden olur [203, 205]. Işınlamanın neden olduğu elektriksel aktif kusurlar, elektronların ve deşiklerin yakalama kesitlerine bağlı olarak yarıiletkenlerde ya tuzak ya da rekombinasyon merkezleri olarak ortaya çıkar [202]. Gama ısıması yoluyla iç yüzeyde meydana gelen kusurlar yarıiletken serbest taşıyıcı yoğunluğunu azaltırken, rekombinasyon merkezleri doğrultucu cihazlarda üretim-rekombinasyon akımı sağlar [203, 207]. Yani, kusurlar,

ışınlama enerjisine bağılı olarak yüzeyde veya yüzeyin derinliklerinde malzemenin özelliğinin değışmesine neden olur [202]. Radyasyona duyarlı malzeme üzerinde radyasyonun iki önemli etkisi olabilir. Yarıiletkenler veya dielektrik malzemelerdeki radyasyon hasarı aşağıdakilerin bir sonucudur: [204].

1. Elektron-deşik çifti oluşumundan kaynaklanan geçici radyasyon kusur durumları; Parçacıklar veya iyonlaştırıcı radyasyon fotonları tarafından elektron-deşik çifti oluşumuyla yük oluşumu ve bağ değışiklikleri,
2. Radyasyon, ışınlanmış malzemenin kristal örgüsünde kalıcı olan deformasyona yol açar; Enerjik parçacıkların kristal yapının atomlarının çekirdekleriyle çarpışmaları yoluyla atomik yer değıştirmelere bağılı olarak artan kusur konsantrasyonu.

Kristal yapıdaki yer değıştirme hasarının neden olduğı kusurların sayısı, ışınlamadan dolayı meydana gelen elektron-deşik çiftlerinin sayısı ile karşılaştırıldığında oldukça azdır [204]. Gr örnekleri ışınılandığında, optik, elektriksel ve dielektrik özelliklerini etkileyen yapısal kusurların ortaya çıkması nedeniyle düzensizlikte bir artış gözlenmiştir [68]. Radyasyon tarafından oluşturulan deşikler elektronlardan daha az hareketlidir ancak yalıtkan vasıtasıyla yayılabilir. Birçok sabit deşik tuzak da mevcuttur. 1 kGy'den daha yüksek radyasyon dozları için, Schottky tabanlı yapının elektriksel özelliklerinde önemli değışiklikler olduğı görülmüştür [56, 57, 69, 208, 209].

Şekil 2.32; iyonlaştırıcı radyasyondan dolayı yarıiletken bir yapıda meydana gelen durumların diyagramının şeklidir. Elektron-deşik çiftleri oluşturulduktan hemen sonra, elektronların çoğı hızla (pikosaniyeler içinde) kapıya doğıru sürüklenirken deşikler ise Si/SiO₂ arayüzüne doğıru sürüklenir. Bununla birlikte, elektronlar oksitten ayrılmadan önce, elektronların bazıları deşiklerle yeniden birleşir. İlk rekombinasyondan kaçan deşikler, oksitten Si/SiO₂ arayüzüne doğıru taşınırlar. Deşikler arayüze yaklaştıkça, bir kısmı yakalanır ve pozitif bir oksit tuzak yükü oluşturur. Eşik (threshold), arayüz tuzakları genellikle p-katkılı transistörler için pozitif yüklü ve n-katkılı transistörler için negatif yüklüdür [210].



Şekil 2.32. Yarıiletken yapılarda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar [210]

Hasar etkinliği; parçacık tipi, parçacık enerjisi, ışınlama sıcaklığı, ölçüm sıcaklığı, ışınlamadan sonraki süre, ışınlama sonrası termal geçmiş, enjeksiyon seviyesi, malzeme türü (n- veya p-tipi gibi), safsızlık ve konsantrasyonu gibi birçok faktöre bağlıdır [205].

Genel olarak, kristal yapının bozulması, bant aralığında enerji seviyelerine yol açabilir. Radyasyon kaynaklı kusurlar; yarıiletken malzemelerin ve cihazların elektriksel ve optik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir, kusur durumlarının kaynağıdır. Yer değiştirme hasarı üreten bir radyasyon ortamında malzemelerin ve cihazların bozulmasına neden olan temel olaylar şunlardır [205]:

- 1) Gelen parçacıklar atomların yerini alır,
- 2) Ortaya çıkan kusurlar yeni enerji seviyelerine yol açar,
- 3) Bu seviyeler malzeme ve cihazın elektriksel ve optiksel özelliklerini değiştirir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tez çalışması kapsamında, Gr'in üstün özelliklerini yarıiletken teknolojisiyle birleştiren bir aygıt geliştirmek üzere, Gr'in üretimindeki zorlukların aşılabilmesi, hibrit yapılarla entegrasyonun sağlanması, üretilen Gr esaslı Schottky diyotların elektriksel, yapısal olarak karakterize edilmesi ve gama ışınımının Gr esaslı aygıt performansına etkisinin araştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Üretilen Gr-Si hibrit yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Gr/Al₂O₃/p-Si yapının elektriksel özellikleri üzerinde radyasyonun etkisini de incelemek için 30 kGy ve 60 kGy dozlarında γ -radyasyonuna maruz bırakılıp akım gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Gr tabanlı diyotun sıcaklığa ve frekansa bağlı elektriksel özellikleri ve bu yapının elektriksel özelliklerinin radyasyondan nasıl etkilendiği incelenmiştir.

3.1. Grafen Sentezlenmesi

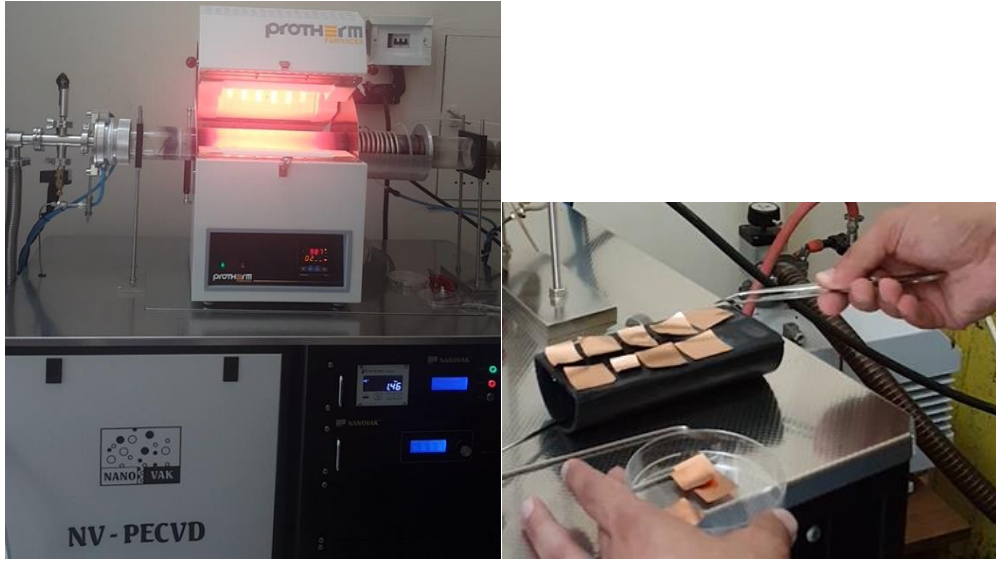
3.1.1. Metal katalizörün temizlenmesi

Kullanılacak metal katalizör seçimi, CVD yöntemi ile tek tabaka Gr'nin büyütülmesinde ve kaliteli Gr nanotabakaların oluşturulmasında oldukça önemli bir aşamadır [106]. Gr'i büyütme için katalizör olarak %99,9 saflıkta, 2 cm×2 cm boyutta Cu folyo kullanılmıştır. Cu folyonun temizlenmesi; büyütülecek Gr'in fiziksel olarak pürüzsüz ve homojen bir yapıya sahip olması ve kimyasal olarak kararlı olması için oldukça önemli bir aşamadır. Cu folyo, ön temizlik olarak, 5 dk süre ile sırasıyla aseton-ultrasonik banyo, izopropanol-ultrasonik banyo ve saf su-ultrasonik banyo yapılmıştır. Bu işlemlerden hemen sonra atmosferik ortamda Azot gazı ile kurutulmuştur. İkinci aşama olarak alkol-su ile ıslak temizleme işlemi yapıp vakum odasına yerleştirilmiştir. Vakum odasında kaplama yapılmadan önce argon gazı ile son kez temizlenmiştir.

3.1.2. Grafenin CVD yöntemiyle sentezlenmesi

Diğer yöntemlere göre tek katman Gr yapı oluşturmada daha homojen büyütme sağladığı için CVD yöntemi tercih edilmiştir. Gr, CVD yöntemiyle %99,9 saflıkta 2 cm×2 cm Cu folyo üzerine büyütülmüştür. Büyütme sırasında karbon kaynağı olarak CH₄ gazı kullanılmıştır. Hem seyreltici gaz hem de tavlama sürecinde H₂, CH₄ kırılmasını

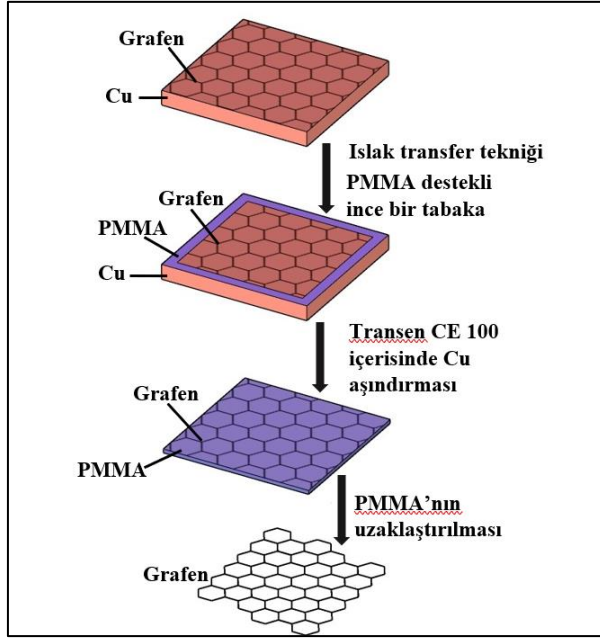
kolaylaştırmak için Ar kullanılmıştır. Vakum çemberinin basıncı 1 mTorr olarak ayarlanarak, vakum ortamının sıcaklığı önce 40 dk boyunca 24 °C'den 1000 °C'ye çıkarılmıştır. Tavlama işlemi, 30 dk, süreyle, 1000 °C'de, 20 sccm akış hızıyla H₂ ve 15 sccm akış hızında Ar gazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 30 dk gazların akış hızı değiştirilmeksizin vakum çemberine 7 sccm akış hızında CH₄ gönderilerek Gr nano tabakaların oluşumu sağlanmıştır.



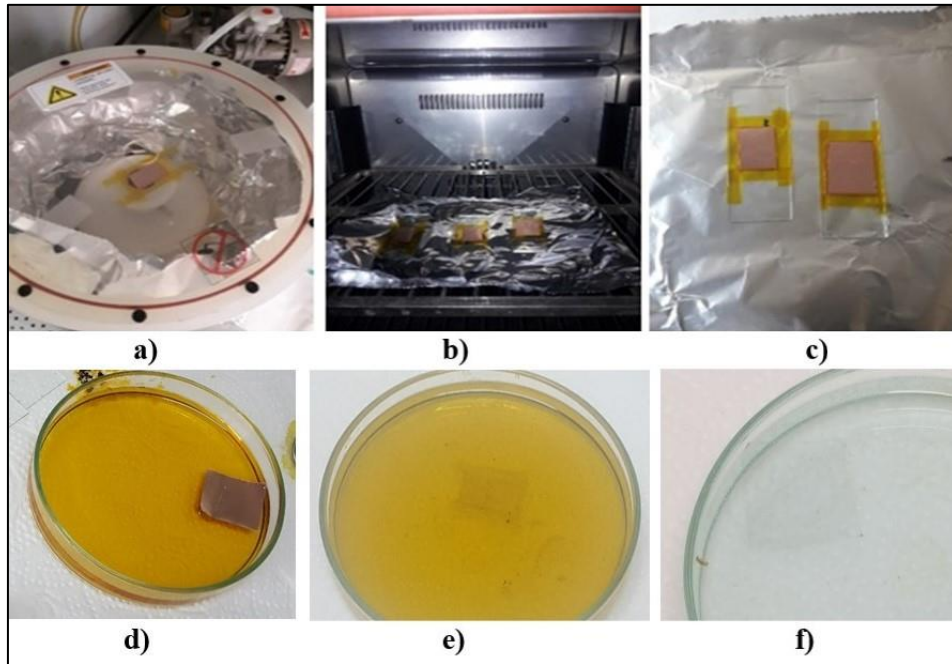
Resim 3.1. a) Gr sentezi için CVD cihazı (Protherm Furnaces- Nanovak PECVD System) (Atatürk Üni.), b) Kuartz numune tutucu üzerinde Cu metalleri

3.1.3. Grafenin transferi

Gr, büyütme işleminin ardından, ilgili alttaş üzerine ıslak transfer tekniği kullanılarak transfer edilmiştir. Transfer süreci Poly(methyl methacrylate (PMMA)/Demir(III)Klorid (FeCl₃) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Transfer işlemine başlarken önce, Cu/Gr bakır alttaşın üst yüzeyi spin kaplama tekniği kullanılarak PMMA ile kaplanmıştır. Metal katalizör olarak kullanılan bakırın aşındırılması (etching) için Cu/Gr/PMMA materyal FeCl₃ solüsyonuna daldırılmıştır. Gr/PMMA film, asetona daldırılarak Gr film üzerindeki polimer uzaklaştırılmıştır. Film üzerindeki kalıntıların uzaklaştırılması için Gr saf suya daldırılmıştır. Bu adımlar PMMA kaplama, Cu'nun aşındırılması, PMMA'nın uzaklaştırılması ve tavlama olarak sıralanır. Son olarak; aygıt üzerine Gr filmin aktarımı için aygıt saf suya daldırılmıştır. Şekil 3.1'de Gr'in alttaş üzerine transfer aşamaları şematik olarak gösterilmektedir. Resim 3.2'de Gr'in transfer sürecinde PMMA ile kaplama, tavlama ve aşındırma süreçlerinin resimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.1. a) Gr transferinin prosesi [26]



Resim 3.2. a) PMMA'nın spin kaplama tekniği ile kaplanması, b) PMMA/Gr/Cu tavlama işlemi, c-d-e) Cu'yu aşındırma, f) PMMA aşındırma işlemi ve elde edilen Gr [21]

Gr'in sentezlenmesi ve transfer süreci aşağıdaki akış şemasındaki (Şekil 3.2b) aşamalarla gerçekleştirilmiştir. Önce Cu folyonun temizlenmesi yapılmıştır. Sonra, Cu folyo üzerine CVD yöntemi ile Gr'in sentezlenmesi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, büyütülen Gr, alttaş üzerine transfer edilmiştir.



Şekil 3.2. Gr aygıt üzerine transfer aşamaları

3.2. Schottky Yapıların Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu

3.2.1. Kristal temizleme

Aygıt için alttaş olarak p-Si alttaş kullanılmıştır. p-Si'nun özellikleri Çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alttaş malzemenin özellikleri

Alttaş	tipi	yönelim	yüzey	öz direnç	kalınlık
Si	p	<100>	SSP	1-10 Ω .cm	380 $\pm$ 20 μ m

İlk olarak, p-Si (100) alttaş, Radio Corporation of America (RCA) temizleme prosedürü uygulanarak temizlenmiştir;

- 50°C'de 10 dakika boyunca aseton içerisine batırılmıştır.
- De-iyonize (DI) su ile yıkanmıştır.
- 2 dakika metanol içerisinde bırakılmıştır.
- 70°C'de NOH₄: H₂O: H₂O₂ çözeltisi eklenmiş DI su içerisinde 15 dakika bekletilerek yıkanmıştır.
- Alttaşı çözeltiden arındırmak için tekrar DI suya batırılmıştır.
- Yüzeyde bulunan serbest oksijeni temizlemek için %2 HF solüsyonu içinde 2 dakika boyunca yıkanmıştır.

- Son kez DI su ile yıkanarak temizleme işlemi yapılmıştır.
- Atmosferik ortamda Azot gazı ile kurutularak temizleme işlemi tamamlanmıştır.



Resim 3.3. Ultrasonik yıkama banyosu

3.2.2. Omik kontağın oluşturulması

Saçtırma yöntemi kullanılarak p-Si alttaşın mat (arka) yüzeyine omik kontak oluşturulmuştur. Öncelikle, kalınlığı ayarlamak için başka malzeme üzerinde kalibrasyon yapılmıştır. Saçtırma işleminde Argon gazı kullanılmıştır. 500 °C’de ve oda sıcaklığında $\sim 4,7 \times 10^{-6}$ Torr basınç altında, saf Alüminyum (~%99,999) Si alttaşın arka yüzeyine ~ 124 nm kalınlığında bir Alüminyum tabaka oluşturulmuştur. 500 °C ‘de 10 dakika tavlantı yapılmıştır. Daha sonra sıcaklık düşürülerek oda sıcaklığında tekrar ~ 124 nm kalınlığında bir Alüminyum tabaka kaplanarak omik kontak oluşturulmuştur.



Resim 3.4. Saçtırma sistemi (Nanovak NVTS 500 Eş Saçtırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.)

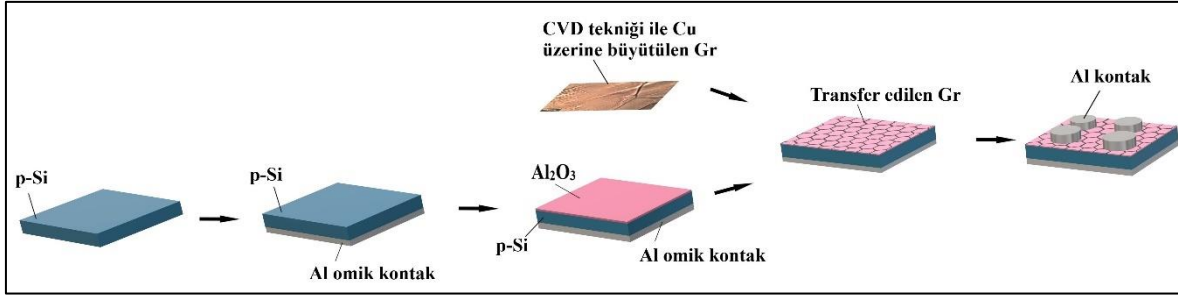
3.2.3. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının fabrikasyonu

Omik kontak için oda sıcaklığında p-Si levhanın (10 cm çapında, 280 µm kalınlığında ve 1 ile 10 Ω cm arasında öz dirence sahip) mat olan arka yüzeyine termal buharlaştırma sistemi kullanılarak saf Alüminyum (~%99,999) omik kontak yapılmıştır.



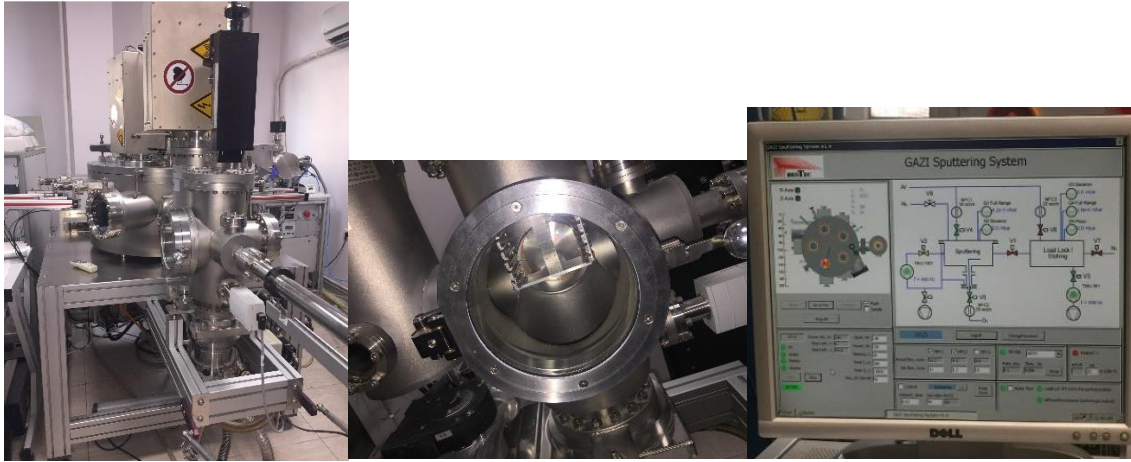
Resim 3.5. Termal buharlaştırma sistemi (Bes Tec Termal Buharlaştırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.)

p-Si levhanın parlak üst yüzeyine Al₂O₃ ince filmi biriktirmek için, RF magnetron saçırma tekniği kullanılmıştır. Bu işlem için %99,9 saflıkta bir Al₂O₃ hedeflenmiştir. İşlem sırasında 150 W güç kullanılmıştır ve kaplama basıncı $4,2 \times 10^{-3}$ mbar'a ayarlanırken, hazne içindeki taban basınç $3,3 \times 10^{-7}$ mbar'da tutulmuştur. Daha iyi bir homojenlik yapı elde etmek için hedef-alt tabaka mesafesi 50 mm'ye ayarlanmıştır. Çalışma gazı olarak Ar (%99,99) kullanılmıştır. O₂ ve Ar gazlarının akış hızları sırasıyla 1,3 sccm ve 12 sccm'dir ve Ar/O₂'nin gaz akış oranı 9/1 olarak ayarlanmıştır. Birikme hızının 0,1 Å/s olduğu ve Al₂O₃ tabakasının kalınlığının 17 nm olduğu gözlenmiştir.

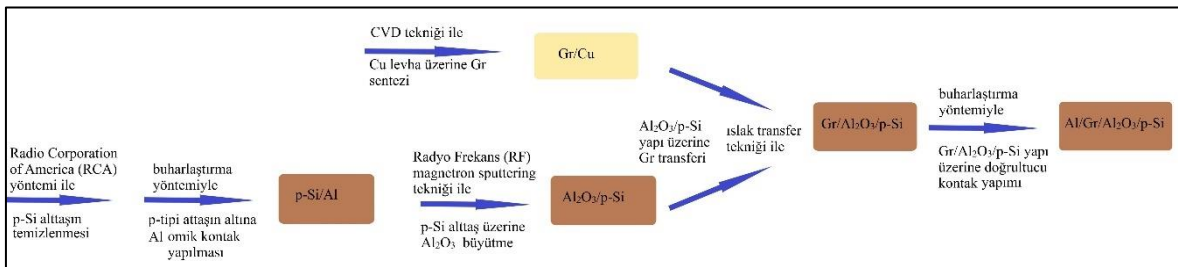


Şekil 3.3. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının üretim aşamaları [22]

Oluşturulan Al₂O₃/p-Si yapının üzerine, Cu levhalar üzerine büyütülen Gr'in transferi için Bölüm 6.1.3 uygulandıktan sonra 1 mm çapında maske kullanılarak, termal buharlaştırma tekniği ile 128 nm kalınlığında doğrultucu kontaklar yapılmıştır.



Resim 3.6. RF magnetron saçtırma (Bestec RF Magnetron Saçtırma Sistemi) (Gazi Üni. Fotonik Lab.)

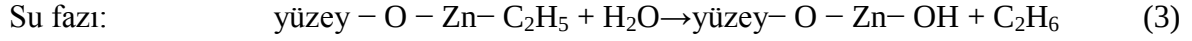
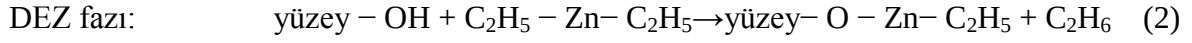


Şekil 3.4. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si Schottky yapının yapım aşaması akış şeması

3.2.4. ALD tekniği ile Al/ZnO/p-Si yapının fabrikasyonu

ALD tekniği kullanılarak, p-Si alttaşın parlak yüzeyine, 170 °C'de 125 döngüde $2,72 \times 10^{-1}$ Torr basınç altında yaklaşık 17 nm kalınlığında ZnO tabaka kaplanmıştır. Bu işlem

sırasında Dietilzinc ($\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ (DEZ) ve H_2O , ALD öncülleri olarak kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak Nitrojen kullanılmıştır.



Nitrojen akış hızı: 7 sccm

Sistemin basıncı: $2,7210^{-1}$ Torr

Çember iç sıcaklığı: 170 °C

Öncül sıcaklıkları: 150 °C

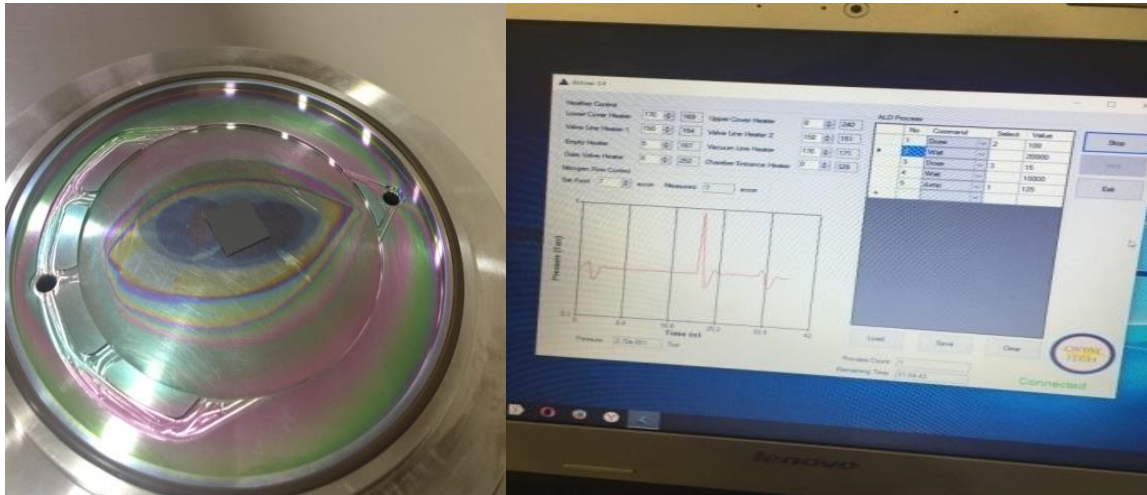
Döngü: 100 ms Dietilzinc

20 s temizleme

15 ms H_2O

10 s temizleme

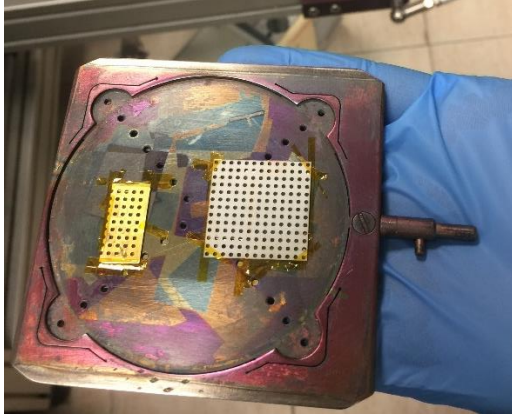
Her bir döngüde $\sim 1,29$ Å kalınlığında ZnO tabaka büyümüştür. Bu döngü 125 defa tekrarlanarak, ALD işlemi sonunda ~ 17 nm kalınlığında ZnO ince film elde edilmiştir.



Resim 3.7. a) ALD cihazının numune haznesi (Okay Tech ALD Atomry T8), b) LabVIEW ekranı (Gazi Üni. Malzeme Müh.)

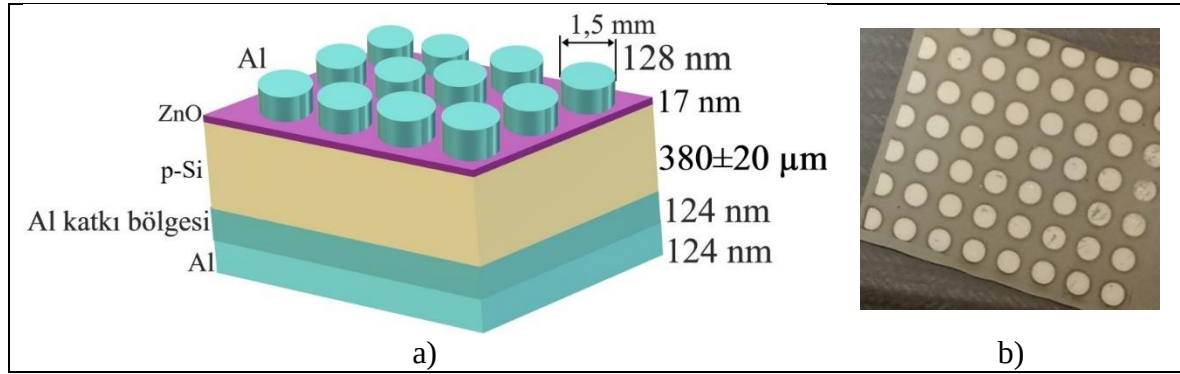
3.2.5. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Rf magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak ZnO ince film üzerine 1,5 mm çapında maske kullanılarak, oda sıcaklığında, $\sim 7,06 \times 10^{-6}$ Torr basınç altında, saf Alüminyum ($\sim 99,999\%$) 128 nm kalınlığında kaplanarak doğrultucu kontaklar oluşturulmuştur.



Resim 3.8. ZnO üzerine maske kullanılarak doğrultucu kontak oluşturulması

Doğrultucu kontağın yapılmasıyla birlikte Al/ZnO/p-Si yapının yapımı tamamlanmıştır ve şematik gösterimi Şekil 3.3.a'daki gibidir.



Şekil 3.5. Al/ZnO/p-Si yapının a) şematik gösterimi, b) fotoğrafı

3.2.6. Karakterizasyon ölçümleri

Akım-voltaj ölçüm sistemi ve kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi

Hazırlanan Schottky yapılardan Al/ZnO/p-Si yapının ve Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının akım-voltaj (I-V) ölçümleri Gazi Üniv. Fotonik Lab.'da bulunan Keithley 4200 akım-gerilim ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Resim 3.9. I-V ölçüm cihazı (Keithley 4200-SCS Semiconductor Characterization System) (Gazi Üni. Fotonik Lab.)

C/G-V ölçümleri Gazi Üniv. Fotonik Lab.'da -6V ile +1V aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında gerilimi ayarlamak için Keithley 4200-SCS, sıcaklığı ölçmek ve ayarlamak için Lake Shore 321 Autotuning Temperature Controller cihazları kullanılmıştır. Kriyostat olarak Janis vpf-475 kullanılmıştır.

Azot kullanılarak sıcaklık önce 80 K'e düşürülüp, farklı frekanslarda, kapasitans ve iletkenlik ölçümleri alınmıştır. Bu bölümler, sıcaklık 300 K'e kadar 50 K adımlarla artırılarak tekrar edilmiştir.



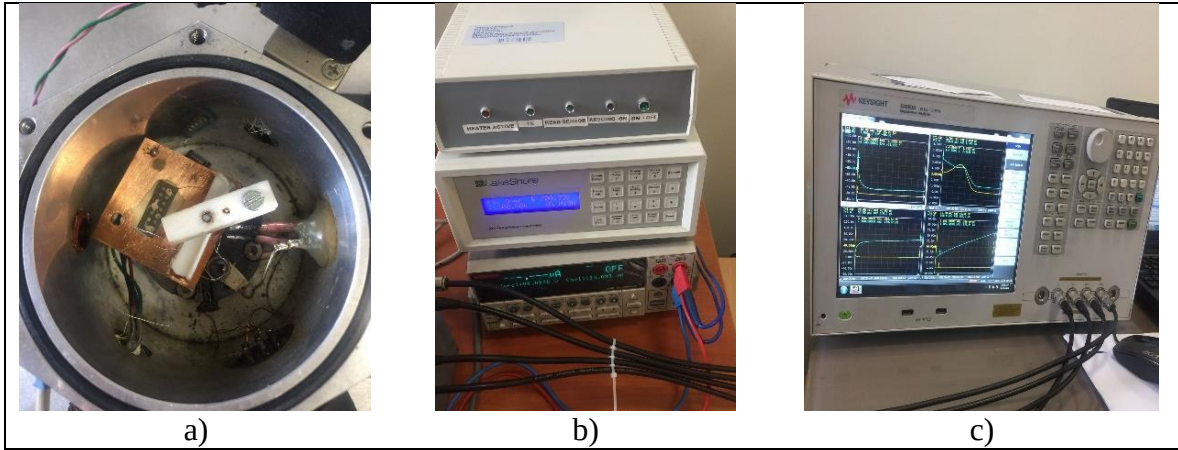
Resim 3.10. Kriyostat; Janis vpf-475 (Gazi Ü. Fotonik Lab.)



Resim 3.11. C-V ölçüm cihazları (Janis vpf-475 kriyostat ve Lake Shore 321 Autotuning Temperature Controller cihazları) (Gazi Ü. Fotonik Lab.)

Gr/Al₂O₃/p-Si yapının gama radyasyonuna (30 kGy ve 60 kGy) maruz bırakıldıktan sonra yapılan I-V ölçümleri Gazi Üniv. Gaz Sensör Aygıtları Araştırma Lab.'nda HP 1740 bilgisayardan kontrol edilerek, Keithley cihazı ile yapılmıştır.

Gr/Al₂O₃/p-Si yapının elektriksel özellikleri üzerinde radyasyonun etkisini de incelemek için yapı 30 kGy ve 60 kGy dozlarında γ -radyasyonuna maruz bırakılıp I-V ölçümleri; sıcaklık 300 K ile 405 K aralığında, 10-400 kHz düşük frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.12. a) Kriyostat b) I-V ölçüm cihazı Keithley 2400 ve c) C-V ölçüm cihazı Keysight E4990A 20 Hz-10 MHz Impedance Analyzer (Gazi Üni. Gaz Sensör Aygıtları Araştırma Lab.)

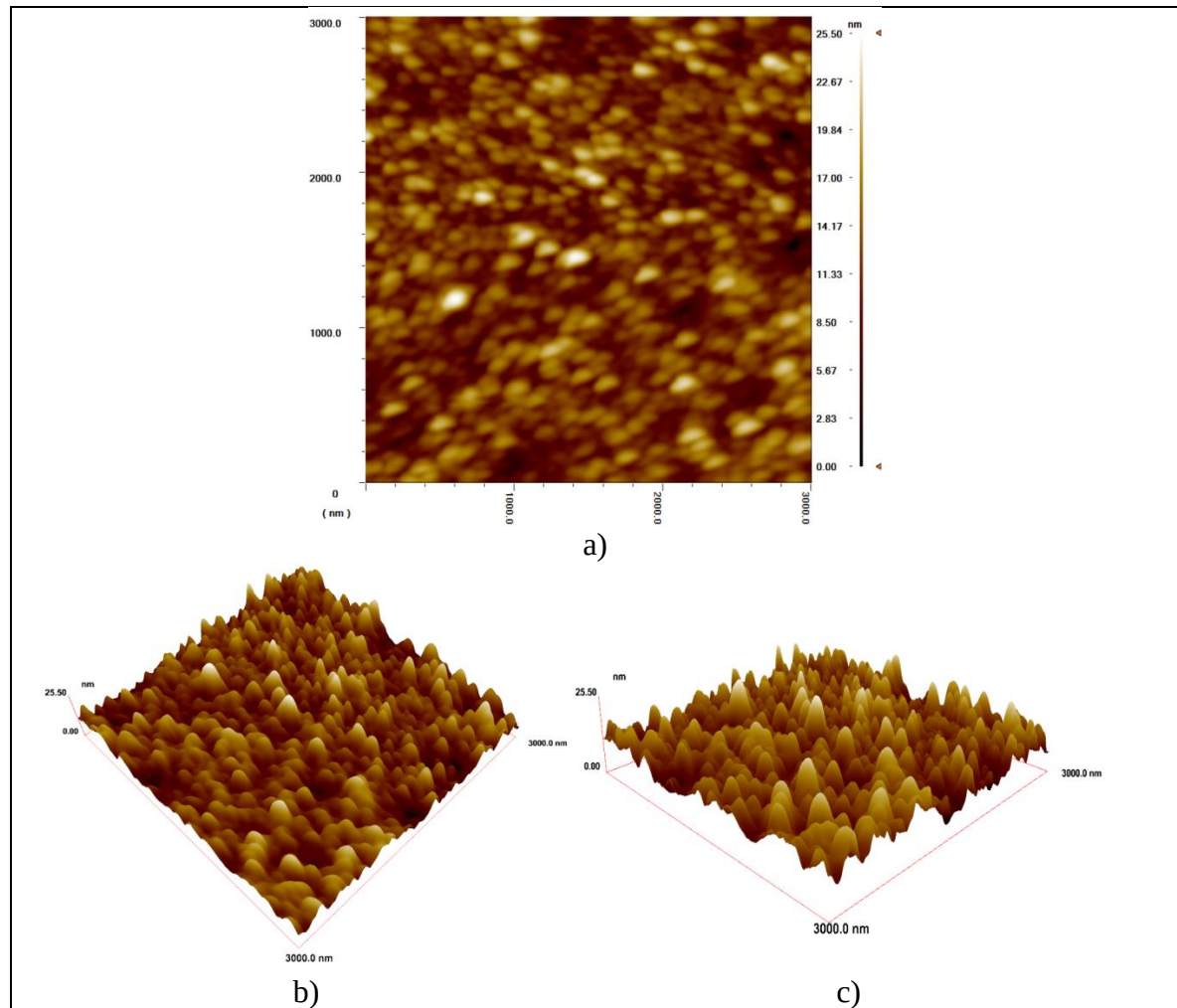
4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Al/ZnO/p-Si Yapı

4.1.1. Yapısal ve görüntüleme analizi

AFM Analizi

ZnO ince filminin yüzey yapısı, oda sıcaklığında, dinamik mod tarama ile yüksek performanslı AFM (Nano Magnetis Instruments Ltd, Oxford, UK) (Gazi Üniv. Fotonik Lab.) kullanılarak belirlenmiştir. Tarama hızı 1 $\mu\text{m/s}$ olarak ayarlanarak, $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ 'lık bir alan taranmıştır. Resim 4.2, p-Si alttaş üzerinde büyütülen ZnO ince filminin AFM görüntülerini ve yüzey morfolojisini göstermektedir [20].

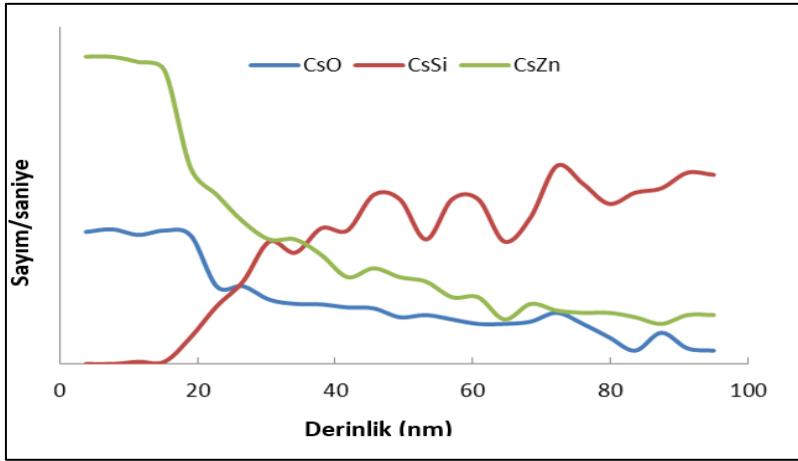


Resim 4.1. ZnO/p-Si yapının $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ taranan alanının yüzey morfolojisi (a) 2D (b), (c) 3D

Resim 4.2'de gösterilen numunenin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanına sahip 3D ve 2D AFM görüntülerinden, yüzeyinin 3,17 nm pürüzlülükle nano ölçekte oldukça homojen olduğu kolayca görülebilmektedir. Özel kusurlar gözlenmemektedir.

SIMS Analizi

ZnO filminin Si alttaşı üzerindeki derinlik profili, saçırma için 5 keV enerjiye ve 30 nA ışın akımına sahip Cs⁺ iyonlu Hiden Analitik SIMS Workstation kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hatalı sinyalleri önlemek için, derinlik profili MCs⁺ küme modunda kaydedilmiştir. Sırasıyla OCs, SiCs ve ZnCs için atomik kütleler 129, 160 ve 197 olarak elde edilmiştir. SIMS ölçümü, 10^{-8} Torr'luk bir vakum basıncında yapılmıştır. Numunenin Cs iyon tabancası ile aşındırılmasıyla elde edilen $100 \mu\text{m}^2$ alana sahip kraterin derinliğini ölçmek için stylus tipi bir profilometre (Veeco, Dektak 150) (Gazi Üniv. Fotonik Lab.) kullanılmıştır. Şekil 4.1, p-Si alttaş üzerinde büyütülen ZnO filminin derinlik profilini göstermektedir [20]. Hem Zn hem de O'nun dağılımının, elde edilen filmin derinliği boyunca tek tip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.1. ZnO filmin SIMS derinlik profili

Ek olarak, ALD tekniği ile 17 nm kalınlığında büyütülen ZnO tabakasının, SIMS derinlik profilinden 15-20 nm arasında olduğu belirlenmiştir.

Hassas olarak dedekte edilen MCs⁺ sinyalleri yardımıyla SIMS sonuçlarından filmin sabit stokiyometrisi olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.2. Akım-voltaj karakteristiği

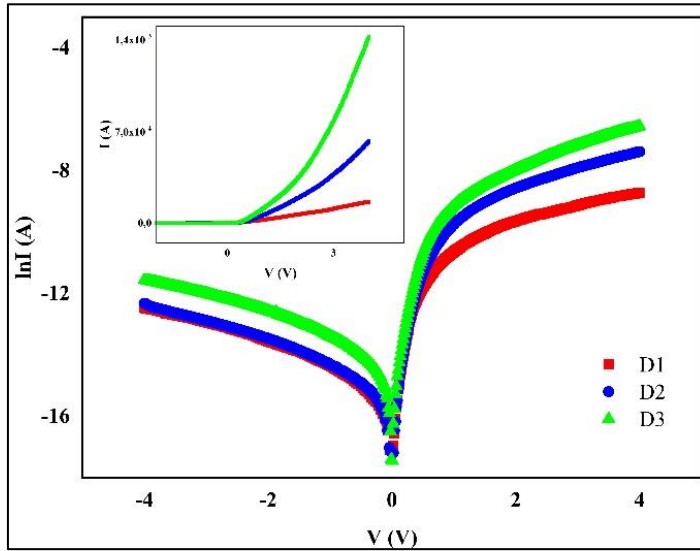
MS, MIS Schottky yapılar için doğru beslem gerilimi ile akım arasındaki ilişki, $V > 3kT/q$ olmak koşuluyla geleneksel termiyonik emisyon (TE) teorisi aşağıdaki gibidir [48, 211].

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (4.1)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (4.2)$$

Ters doyma akımı I_0 , $\ln(I)$ - V grafiğinin $V=0$ 'da $\ln(I)$ 'yı kestiği noktadan elde edilir. T , k , q sırasıyla sıcaklık (Kelvin), Boltzmann sabiti ve elektron yüküdür. A^* Richardson sabiti (p-Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$). A , ϕ_b , V sırasıyla diyot alanı, efektif bariyer yüksekliği ve uygulanan voltajdır [186, 211].

Şekil 4.2'de Al/ZnO/p-Si Schottky yapının aynı şartlarda oluşturulmuş üç diyotun yarı logaritmik akım-voltaj ($\ln(I)$ - V) grafiği gösterilmektedir [20].



Şekil 4.2. Al/ZnO/p-Si yapının yarı logaritmik I-V grafiği

Her üç diyot için doğru beslem akımı ters beslem akımına göre uygulanan voltaja daha bağlıdır hatta eksponansiyel olarak artmaktadır. Belirli bir voltaj değerinden sonra doğru beslem akımı doğrusallıktan sapmaktadır. Bu durum arayüzey tabakasından ve seri dirençten kaynaklanmaktadır.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

$$\varphi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.4)$$

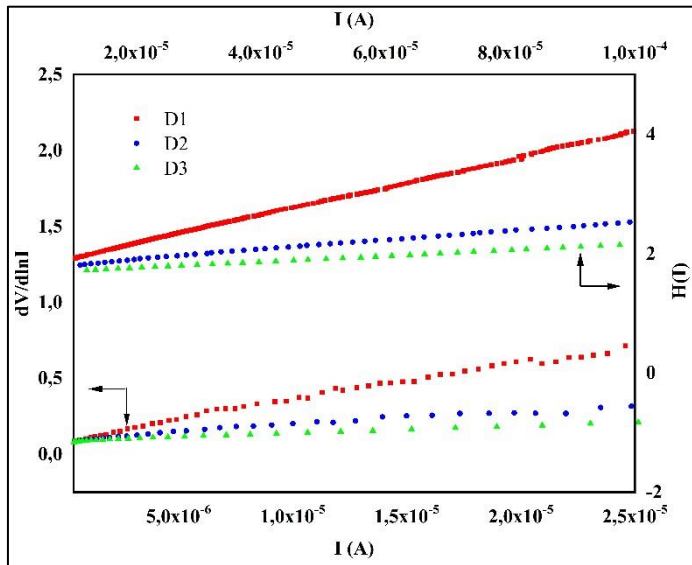
n idealite faktörü, yarı-logaritmik I - V grafiğindeki eğim kullanılarak, Eş. (4.3)'ten bulunur [186, 212]. $V > 3kT/q$ bölgesinde, Şekil 4.2'deki eğiminden n hesaplanır, $V=0$ iken $\ln(I_0)$ grafikten bulunarak φ_b hesaplanır.

R_s , ileri beslem I - V özelliklerinin aşağı doğru eğimin doğrusal bölgesinde önemlidir, ancak, φ_b , ve n hem doğrusal bölgede hem de doğrusal olmayan bölgede önemli parametrelerdir. R_s , φ_b , ve n , S.K. Chung ve N.W. Chung tarafından geliştirilen Cheung fonksiyonları [213] ile hesaplanır. R_s , φ_b , n ve $H(I)$, Eş. (4.5, 4.6 ve 4.7)'de belirtilmiştir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.5)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (4.6)$$

$$H(I) = n\varphi_b + IR_s \quad (4.7)$$

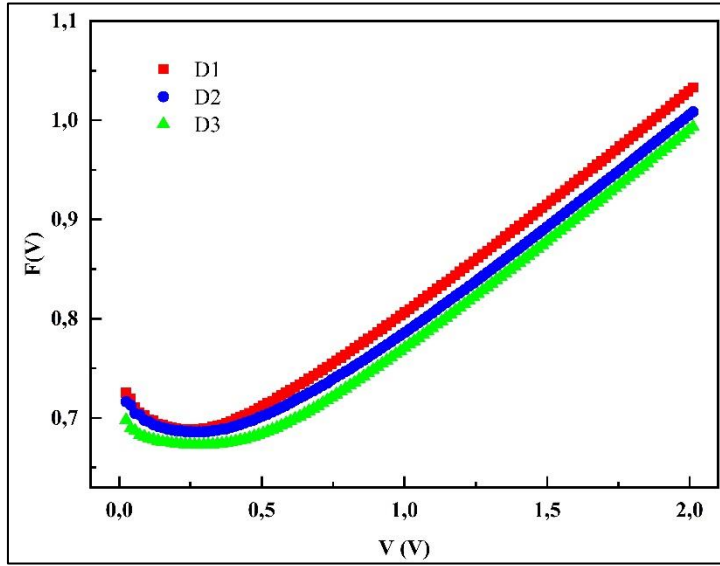


Şekil 4.3. Al/ZnO/p-Si yapının $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiği

$dV/d\ln I$ eğrisinin eğimi R_s değerini verir. Eğrinin kesme noktasından Eş. (4.5) ile n değeri elde edilir. $H(I)$ - I eğrisinin eğiminden R_s bulunur ve elde edilen n değeri kullanılarak Eş. (4.7)'den ϕ_b hesaplanır.

Schottky yapılar da doğru beslem akım-gerilim karakteristiklerinde R_s oldukça önem arz etmektedir. Bir diğer I - V karaktersitik belirleme yöntemi olan Norde [214, 215] yöntemi kullanılarak R_s ve ϕ_b değerleri hesaplanmaktadır.

$$F(V, I) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (4.8)$$



Şekil 4.4. Al/ZnO/p-Si yapının $F(V)$ - V grafiği

$$\phi_b = F(V_0) - \frac{kT}{q} + \frac{V_0}{\gamma} \quad (4.9)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0} \quad (4.10)$$

Eş. (4.9)'daki $F(V_0)$, Şekil 4.4'deki $F(V)$ -Voltage (V) grafiğinin minimum değeridir. I_0 ve V_0 bulunan minimum $F(V_0)$ değere karşılık gelen minimum akım ve voltajdır. γ , n 'den büyük bir tam sayıdır.

Çizelge 4.1'de Al/ZnO/p-Si yapısı için TE, Norde ve Cheung metodlarına göre elde edilen n , ϕ_b ve R_s değerleri görülmektedir [20].

Çizelge 4.1. Al/ZnO/p-Si yapının I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri

Metodlar		Diyotlar								
		D1			D2			D3		
		n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)
TE		1,44	0,73	-	1,75	0,73	-	1,64	0,72	-
Cheung	dV/dlnI - I	2,85	-	32,93	2,54	-	34,80	2,58	-	5,58
	H(I) - I	-	0,72	21,56	-	0,82	7,01	-	0,77	4,5
Norde		-	0,73	174	-	0,73	170	-	0,71	111

n değerleri her üç diyot için TE teorisine göre ve Cheung metoduna göre uyumludur. Beklendiği gibi ideal kabul edilen ($n=1$) Norde yöntemi kullanılarak elde edilen R_s değerleri, hem TE hem de Cheung yöntemleri kullanılarak elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bunun sebebi, Norde modeli tüm doğru beslem bölgesi için uygulanırken, Cheung'un modeli doğru beslem bölgesinin doğrusal olmayan bir yüksek voltaj bölgesi için uygulanmasıdır. Çizelge 4.1'den de anlaşılacağı üzere bulunan ϕ_b değerleri uyumlu olmakla birlikte birbirinden farklıdır.

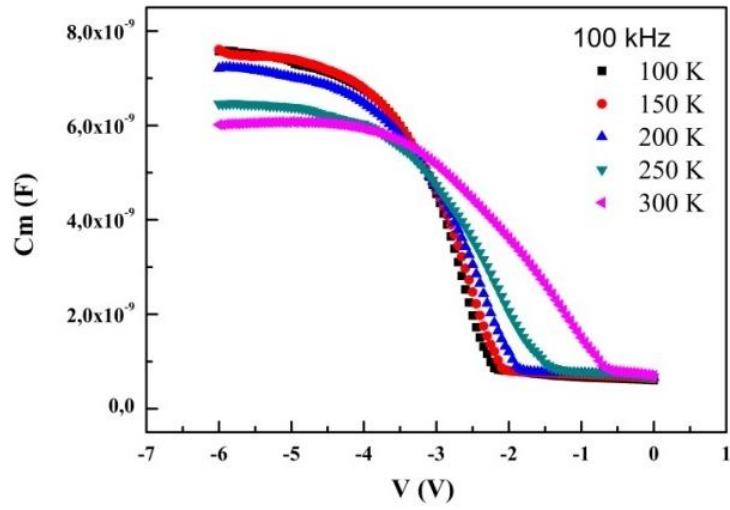
4.1.3. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj

$$C_c = \left(\frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{(a^2 + \omega^2 C_m^2)} \right); \quad G_c = \left(\frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{(a^2 + \omega^2 C_m^2)} \right) \quad (4.11)$$

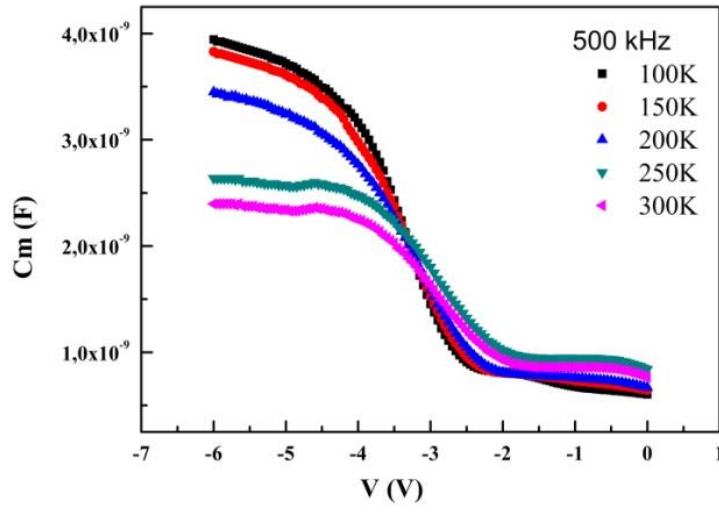
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s; \quad C_i = C_m \left[1 + \frac{G_m^2}{(\omega C_m)^2} \right] = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{d} \quad (4.12)$$

ϵ_i , ϵ_0 , A , d sırasıyla arayüzey tabakanın dielektrik sabiti (ZnO için $\epsilon_i = 8.65\epsilon_0$), vakum dielektrik sabiti ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m), diyotun alanı, arayüzey tabakanın kalınlığıdır. C_i değeri G-V grafiğinde birikim bölgesinden elde edilen değer C-V grafiğinden karşılığıdır [180]. C_i değerini 8,45 nF olarak elde edilmiştir.

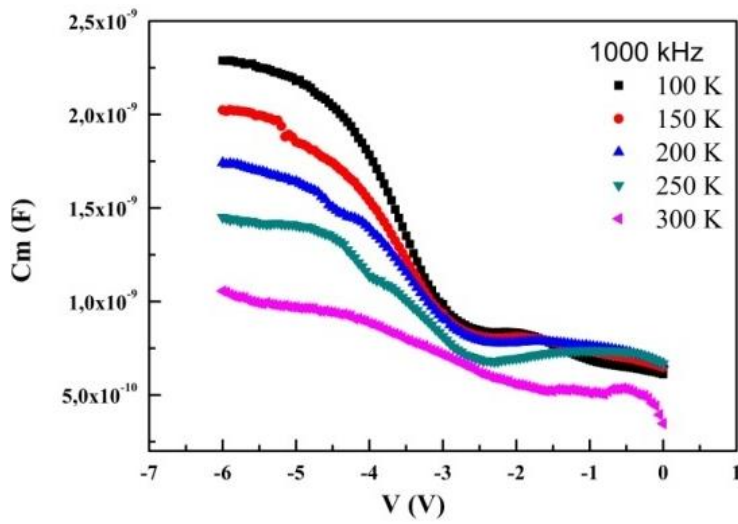
Al/ZnO/p-Si yapısının 100-500-1000 kHz ve çeşitli sıcaklıklarda artan voltaj ile ölçülen (Şekil 4.5) ve düzeltilen (Şekil 4.6) kapasitans gösterilmektedir [137]. Tükenim bölgesinde, aynı sıcaklıklarda C_m değeri C_c değerinden daha düşüktür. C_m ve C_c değerleri, üç frekansta da sıcaklık arttıkça artmaktadır.



a)

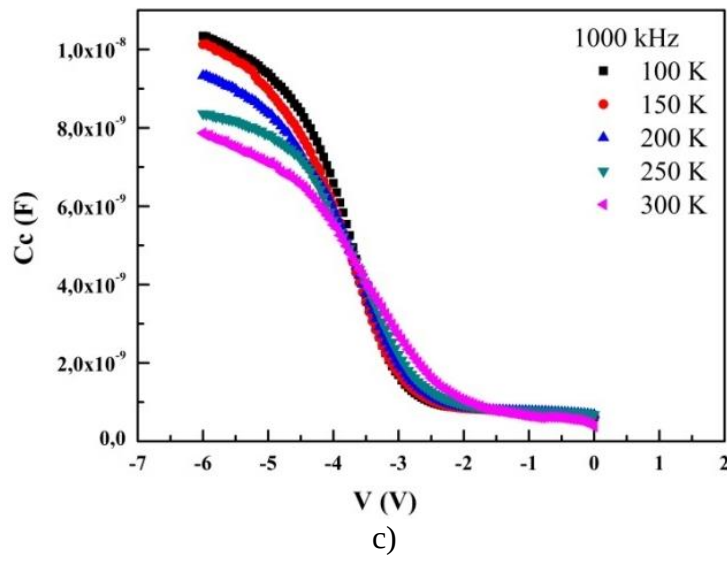
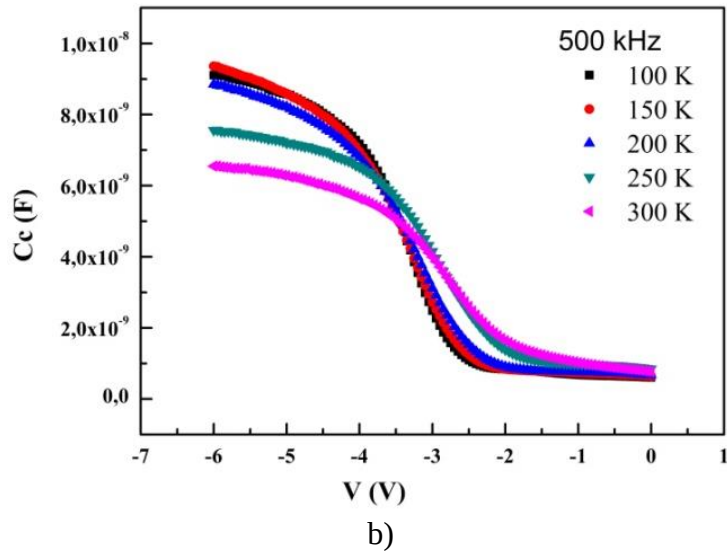
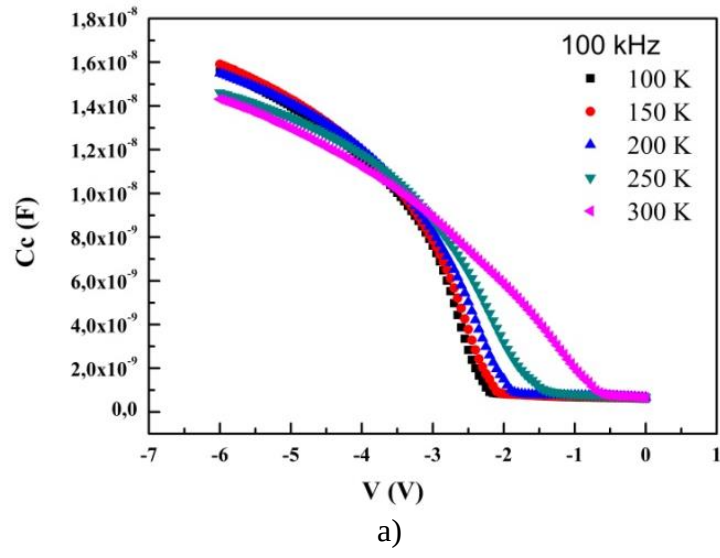


b)



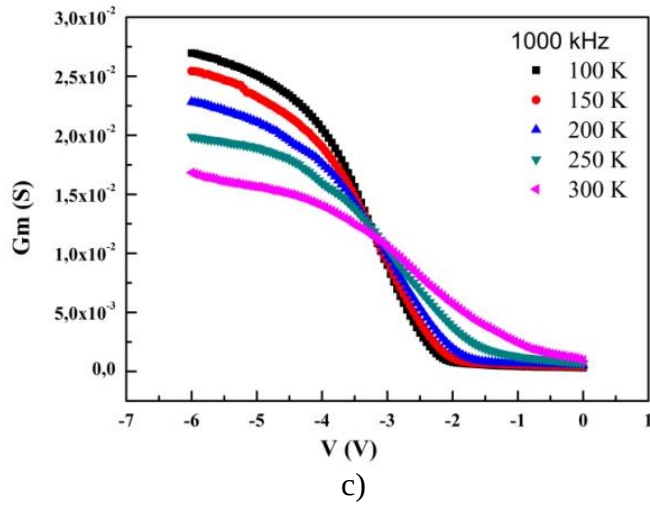
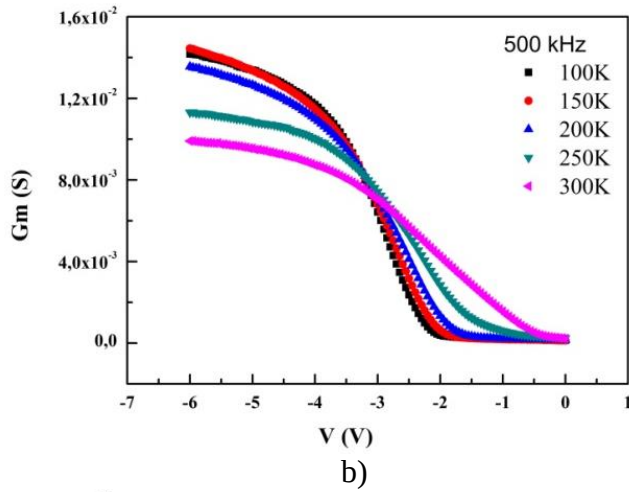
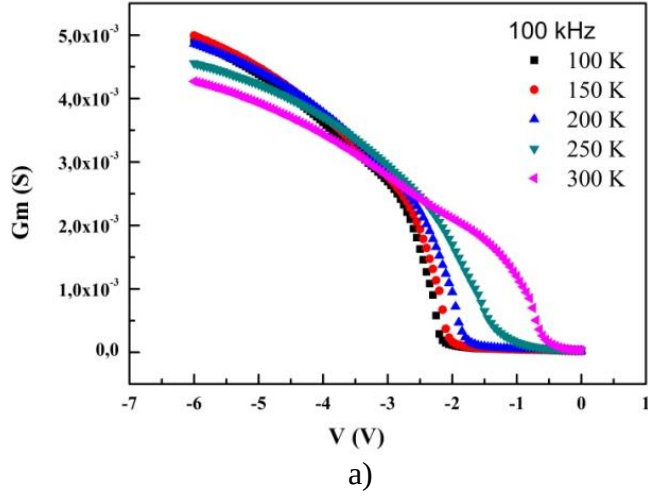
c)

Şekil 4.5. Al/ZnO/p-Si yapının ölçülen C_m -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz

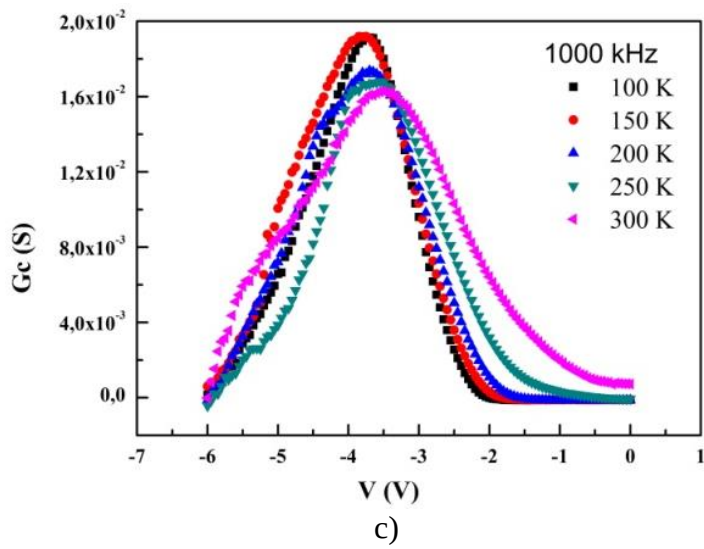
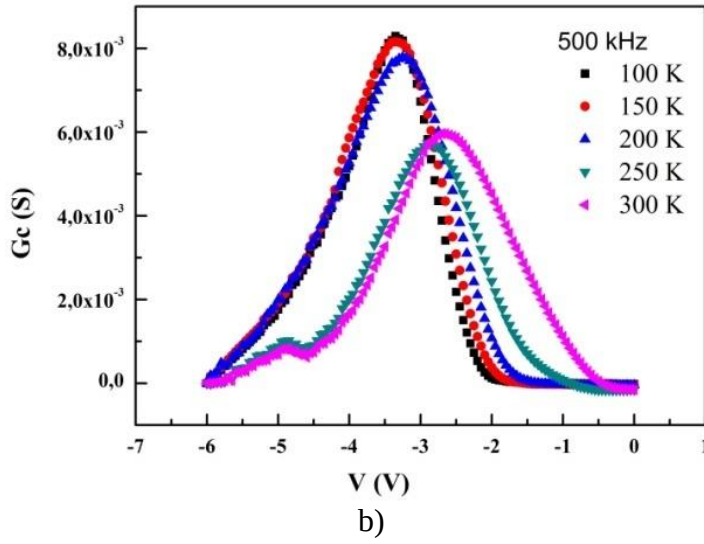
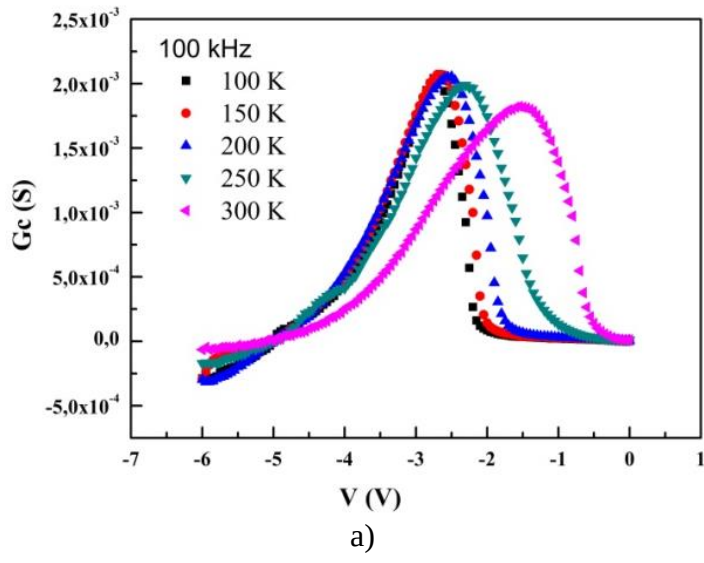


Şekil 4.6. Al/ZnO/p-Si yapının düzeltilmiş C_c -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz

Al/ZnO/p-Si yapının, 100-500-1000 kHz ve çeşitli sıcaklıklarda, voltaja bağlı ölçülen (Şekil 4.7) ve düzeltilen (Şekil 4.8) iletkenlik grafikleridir [137]. G_m 'den farklı olarak, tüm G_c 'nin tüm frekanslarda ve sıcaklıklarda pik yaptığı görülmektedir. G_c tepe noktaları sıcaklığa bağlı olarak sağa kaymaktadır.



Şekil 4.7. Al/ZnO/p-Si yapının ölçülen G_m -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz



Şekil 4.8. Al/ZnO/p-Si yapının düzeltilmiş G_c -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz

Ölçülen hem C hem de G değerlerinin hem doğru beslem hem de sıcaklık ile bağlantılı olduğu Şekil 4.5-8 grafiklerinden anlaşılmaktadır. İletkenlik ve kapasitans grafikleri; tersinim, birikim ve tükenme bölgelerine sahiptir. Ayrıca, tükenme bölgesinde artan sıcaklık ile G ve C değerleri azalmaktadır. Kapasitans ve iletkenliğin gözlemlenen tepe konumu, yüksek sıcaklıkta doğru beslem bölgesine kayar.

Defleksiyon akımı SBD'un seri direncinden kaynaklanır. Bu nedenle seri direnç MIS yapıların elektriksel özelliklerinde değişime yol açan önemli bir parametredir. Seri direnç (R_s) parametresi Nicollian ve Brews spektroskopi yöntemini kullanarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [180].

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.13)$$

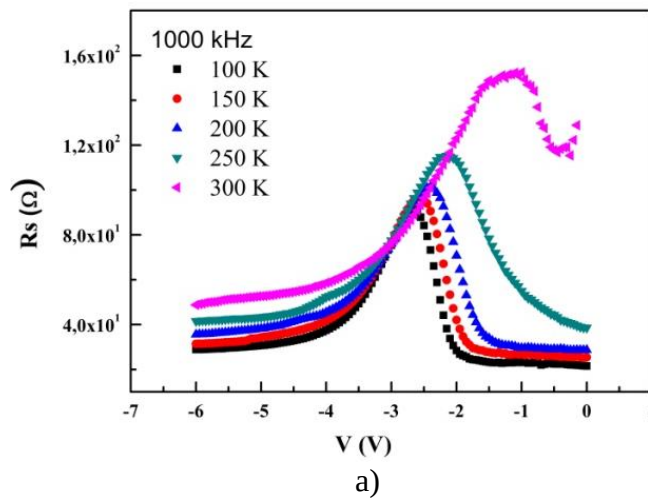
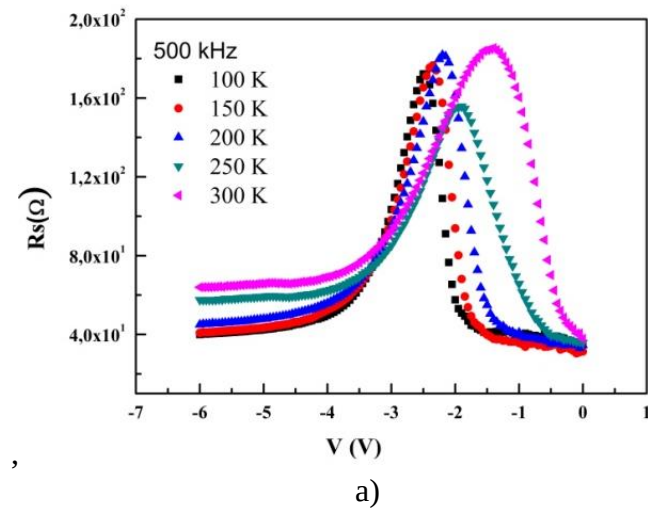
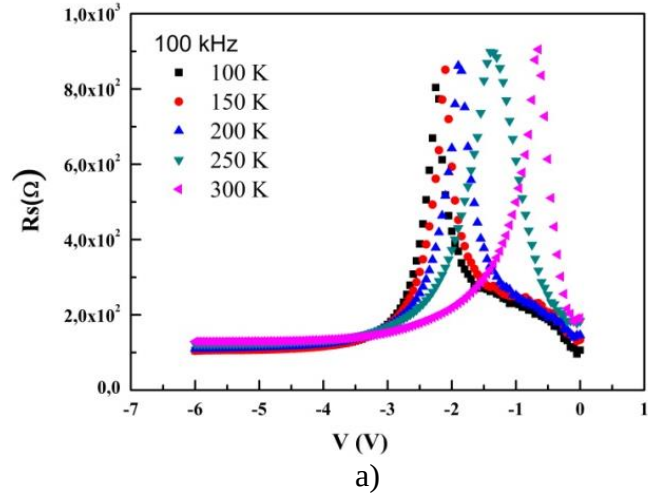
C_m ve G_m güçlü yığılma bölgesindeki ölçülen kapasitans ve iletkenlik, ω açısal frekanstır. Bu metod kullanılarak, tüm ölçülen diyot aralığında R_s değerleri hesaplanır [180].

Yapının sıcaklığa bağlı seri direnci, ZnO tabakasında ara yüzey durumunun varlığı, ara yüzey durumunun yoğunluğu ve enerjiyle ilişkilidir. Benzer şekilde Sands, Brunson ve Tayarani-Najaran (1992), bir birikim bölgesindeki kapasitans değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığını göstermiştir [216].

Üretilen yapının 100, 500, 1000 kHz frekanslarında G-V ve C-V özellikleri karşılaştırıldığında, artan frekansla birlikte G ve C değerleri azalmıştır. Düşük frekansta, daha uzun zaman sabiti sayesinde arayüzey durumu bir AC sinyali takip edebilir. Bu nedenle arayüzey durumlarının etkisi düşük frekansta dikkat çekicidir. C-V grafikleri, yüksek frekansta ($f \geq 500$ kHz) arayüzey durumunu izleyemez [213, 215, 217]. Bu durumda, arayüzey durum kapasitansının eklenmesi ihmal edilecek kadar küçüktür ve eğriler ideal davranış sergiler. G ve C değerlerinin değişen frekansa güçlü bir şekilde bağlı olduğu görülmüştür.

Şekil 4.9, çeşitli frekanslarda ve sıcaklıklarda yapı için R_s 'nin voltaj bağımlılığını göstermektedir [137]. Gerilime karşı seri direnç eğrileri, farklı sıcaklıklar için dikkate değer bir tepe noktası gösterir, seri direnç tepe değerleri ileri besleme doğru kayar. Değişen sıcaklıklar ve frekanslar altında arayüzey durumunun yeniden düzenlenmesi ve yeniden

yapılandırılması nedeniyle R_s 'nin tepe değerlerinin sıcaklıkla orantılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. Al/ZnO/p-Si yapının R_s -V grafikleri (a) 100 kHz, (b) 500 kHz ve (c) 1000 kHz

Arayüzey durumunu hesaplamak için Hille-Coleman yöntemi, tek frekans yaklaşımı kullanılmıştır. Arayüzey durumu (D_{it}) aşağıdaki gibi belirlenir [218].

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left(\frac{(G_{c,max}/w)}{(G_{c,max}/wC_i)^2 + (1 - C_c/C_i)^2} \right) \quad (4.14)$$

$G_{c,max}$, G_c -V grafiğinde maksimum değere karşılık gelir. Arayüzey durumu kapasitansı (C_i) ve iletkenlik $G_{c,max}$, Eş. (4.11 ve 4.12)'de verilmiştir.

Çizelge 4.2'de, 100-300 K sıcaklıklar arasında frekansa bağlı elde edilen D_{it} değerleri gösterilmektedir [137]. D_{it} , düşük frekans değerlerindeki aksine yüksek frekanslarda A.C. sinyalini izleyemediği için D_{it} değerleri artan frekansla azalır. Elde edilen D_{it} değerleri, yarıiletken ve metalde ZnO tabakasının varlığı ile akredite edilmiştir.

Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı arayüzey durumları (D_{it})

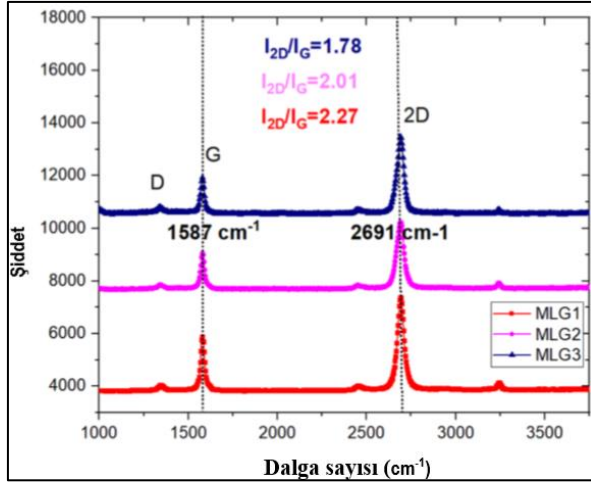
Frekans (kHz)	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) 100 K	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) 150 K	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) 200 K	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) 250 K	D_{it} ($\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$) 300 K
100	$8,54 \times 10^{12}$	$7,76 \times 10^{12}$	$7,34 \times 10^{12}$	$7,66 \times 10^{12}$	$6,22 \times 10^{12}$
500	$5,73 \times 10^{12}$	$5,74 \times 10^{12}$	$5,15 \times 10^{12}$	$3,62 \times 10^{12}$	$2,99 \times 10^{12}$
1000	$4,87 \times 10^{12}$	$4,61 \times 10^{12}$	$3,93 \times 10^{12}$	$3,35 \times 10^{12}$	$2,44 \times 10^{12}$

4.2. Grafenin Karakterizasyonu

Gr bazlı araştırmalarının en önemli kısmı Gr'nin karakterizasyonudur. Bu karakterizasyon, Gr'in yapısı, kusurları ve tabaka sayısı gibi özelliklerinin mikroskopik ve spektroskopik ölçümlere dayalı olarak araştırılmasını içerir.

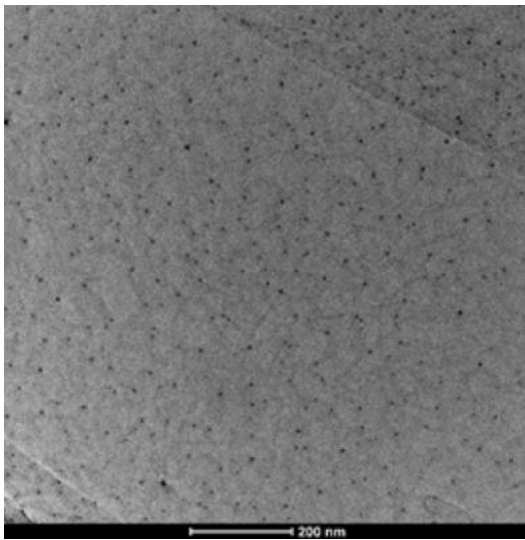
Bu çalışmada 2D Gr VGrN'lerin karakterizasyonu, 532 nm uyarıcı lazer kaynağı kullanılarak WITech alpha 300R marka Raman spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Bu karakterizasyon, LP işlemine tabi tutulup p-Si alttaş üzerine 750 °C büyüme sıcaklığı ve 100 W RF gücü kullanılarak sentezlenen VGN'lerin Raman spektrumları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. CVD yöntemiyle büyütülen Gr'in film katmanlarının sayısının belirlenmesi, Şekil 4.10'da görüldüğü gibi Raman spektroskopisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, sırasıyla 1587 cm^{-1} ve 2691 cm^{-1} 'de G ve 2D karakteristik piklerini gösterilmektedir [26]. Ayrıca D ve D+G gibi bazı pikler de tanımlanmıştır ancak bu pikler çok zayıftır. Raman

spektrumunda D, G ve 2D piklerinin varlığı ve şiddetlerinin birbirine göre oranları (I_{2D}/I_G), elde edilen Gr katmanlarının sayısının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. CVD yöntemi ile elde edilen Gr filmlerin I_{2D}/I_G oranları sırasıyla 2,27, 2,01 ve 1,78 olarak hesaplanmış ve bu filmler sırasıyla MLG1, MLG2 ve MLG3 (mono layer graphene) olarak kodlanmıştır.



Şekil 4.10. Raman spektrumları

CVD Gr transferinin olumsuz etkileri olup olmadığını görmek ve Raman analizi ile tespit edilen katman sayısını doğrulamak için MLG1 nolu Gr örneği ile TEM analizi yapıldı ve Resim 4.3’de gösterilmektedir [26].



Resim 4.2. MLG1 numunesinin TEM görüntüsü

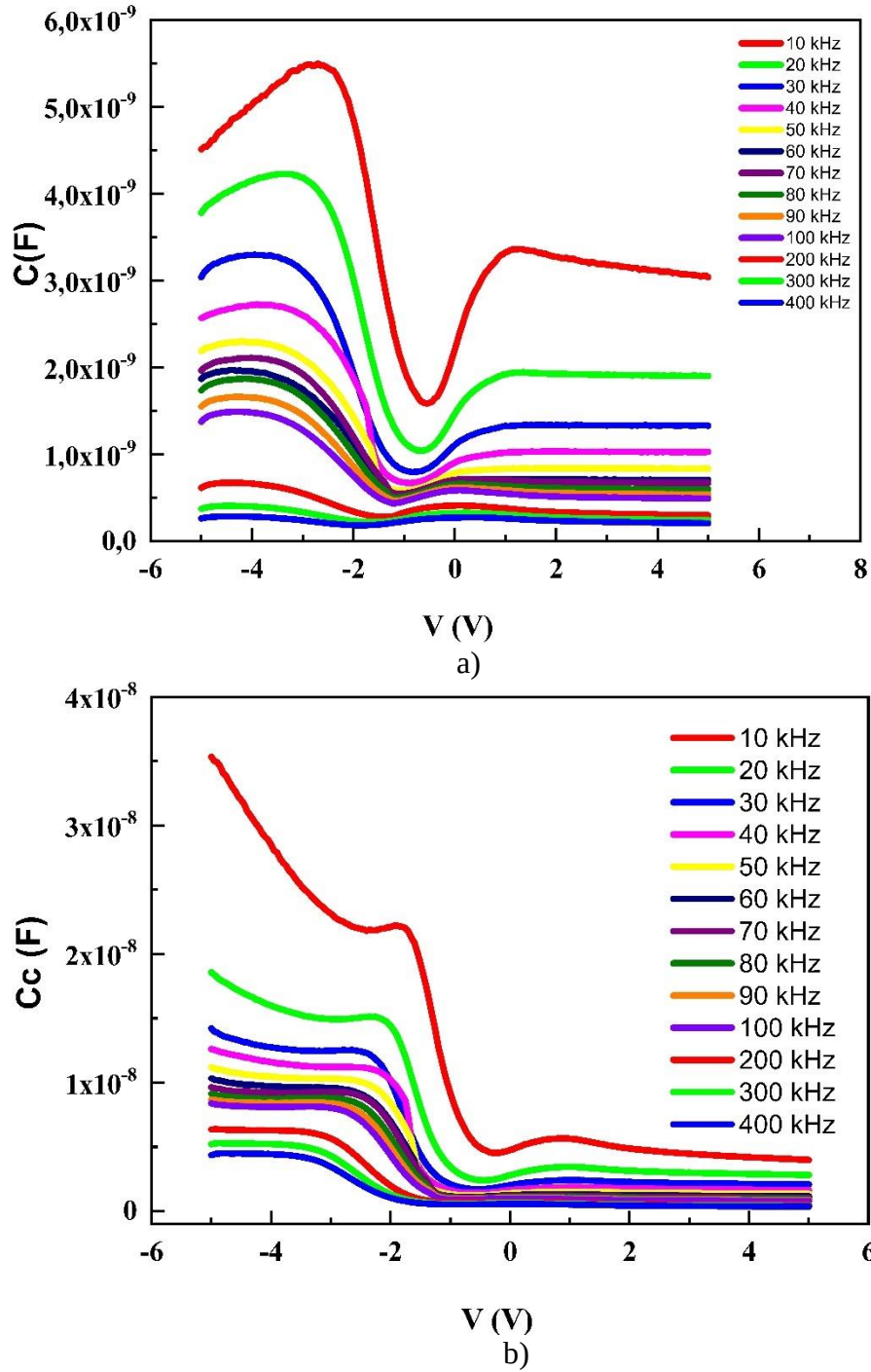
TEM analizinde, Gr'in alttaş olarak kullanılan p-Si'yi mükemmel bir şekilde kapladığını yani kırışıklık olmadığını ve aynı zamanda da tek katmanlı olduğu anlaşılmaktadır.

4.3. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si Yapı

4.3.1. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj karakteristiği

Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının frekansa duyarlı kapasitans/iletkenlik-voltaj (C/G-V) özelliklerini araştırmak için ölçümler 10 kHz–400 kHz frekans aralığında ve 300 K'de yapılmıştır. Voltaj limiti $\pm 5V$ DC olarak ayarlanmıştır. Giriş ölçümlerinden yapının arayüzey durumları ve seri direnci gibi elektriksel parametreleri incelenmiştir. Alüminyum oksit (Al₂O₃) ince filmler, Radyo Frekansı (RF) magnetron saçtırma tekniği ile p-Si levha üzerine oda sıcaklığında biriktirilmiştir (bölüm 3.2.3). Tek katmanlı Gr'in Al₂O₃/p-Si üzerine biriktirilmesi için standart yöntem olan CVD yöntemi uygulandı (Bölüm 3.1). Elde edilen C/G-V verileri kullanılarak bölüm 4.1.3'deki formüller yardımıyla D_{it} ve R_s değerleri incelenmiştir [56].

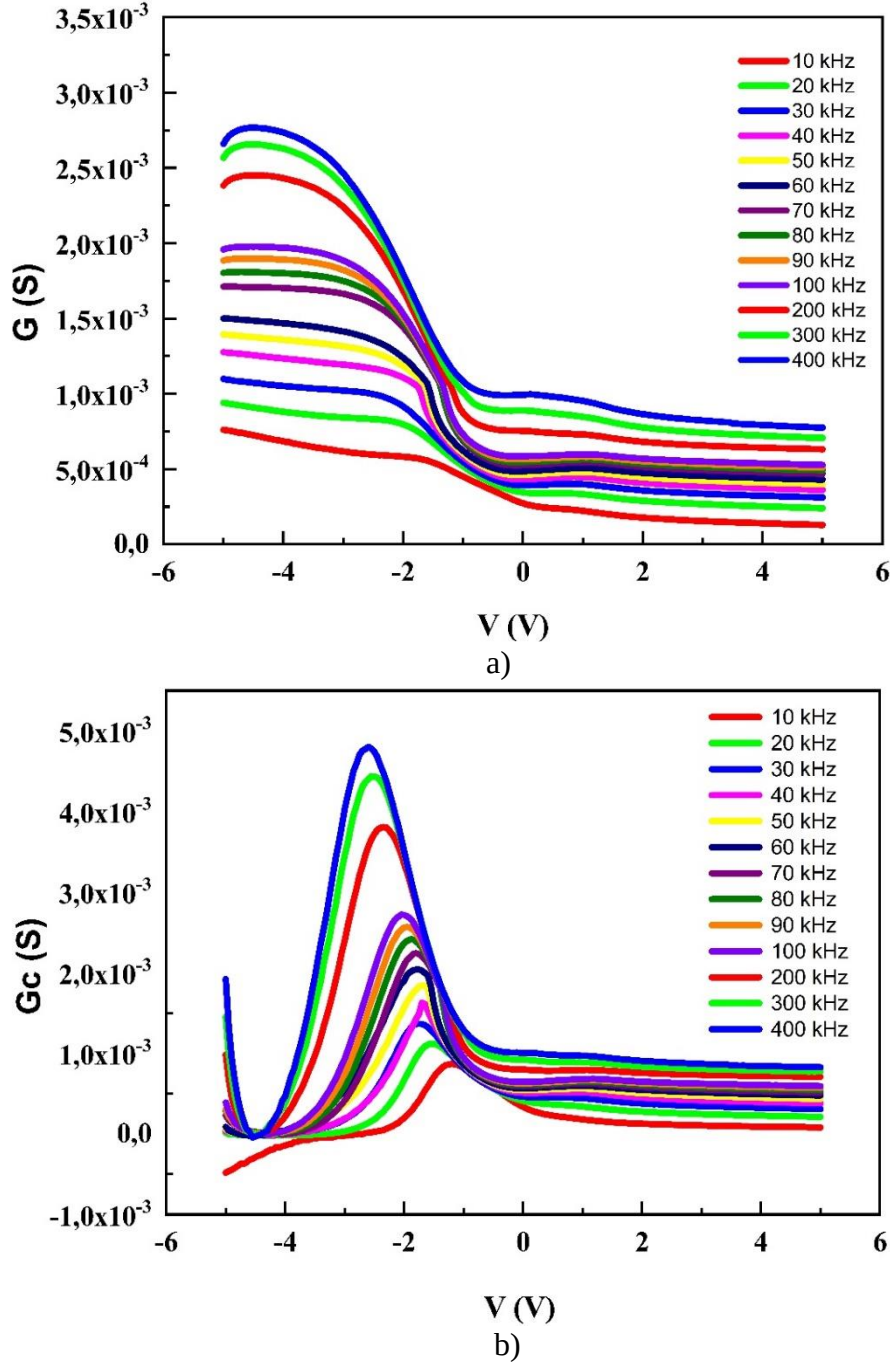
Şekil 4.11; Al/Al₂O₃/p-Si yapının, her bir frekans için uygulanan voltaja bağlı C ve C_C grafiklerini Frekans arttıkça kapasitans değerleri azalır. Bu davranış, arayüzey durumlarının varlığı ile ilgilidir ve uygulanan AC sinyalinin frekansına bağlıdır. Yüksek frekans altında, arayüzey durumlarındaki yükler $1/\omega$ 'den daha büyük bir ömre (τ) sahiptir (ω açısal frekanstır), bu nedenle AC sinyalinin takip edemez [219, 220]. Bu durumda arayüzey durumları yarıiletken ile dengededir. Arayüzey durumlarından dolayı kapasitansta önemsiz bir katkı vardır. Ayrıca yük taşıyıcılar Gr/Al₂O₃ arayüzeyinde sıkışıp kalırlar. Uygulanan AC frekansı düştükçe azınlık taşıyıcıları AC sinyalinin takip edebilir. Bu durumda, arayüzey durumları kapasitansa katkıda bulunur. İletkenlik ve kapasitans değerleri, enerji dağılımı ve seri direnç, arayüzey durumları veya oluşumu ve Al₂O₃ ve Gr kalınlığı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu nedenle, düşük frekanslarda daha yüksek bir C gözlenir. Çünkü Gr/Al₂O₃ ile arayüz katmanı arayüzey yüklerinin sayısını değiştirir ve bu da Gr/Al₂O₃ ile yapının tükenim bölgesinde bir değişikliğe neden olur. Yarıiletken/arayüz tabakasındaki bu tür homojen olmayan bir yük tabakasının kapasitansı, frekans dağılımına neden olan arayüzey tabakası kapasitansı ile ilave bir kapasitansa katkıda bulunacaktır.



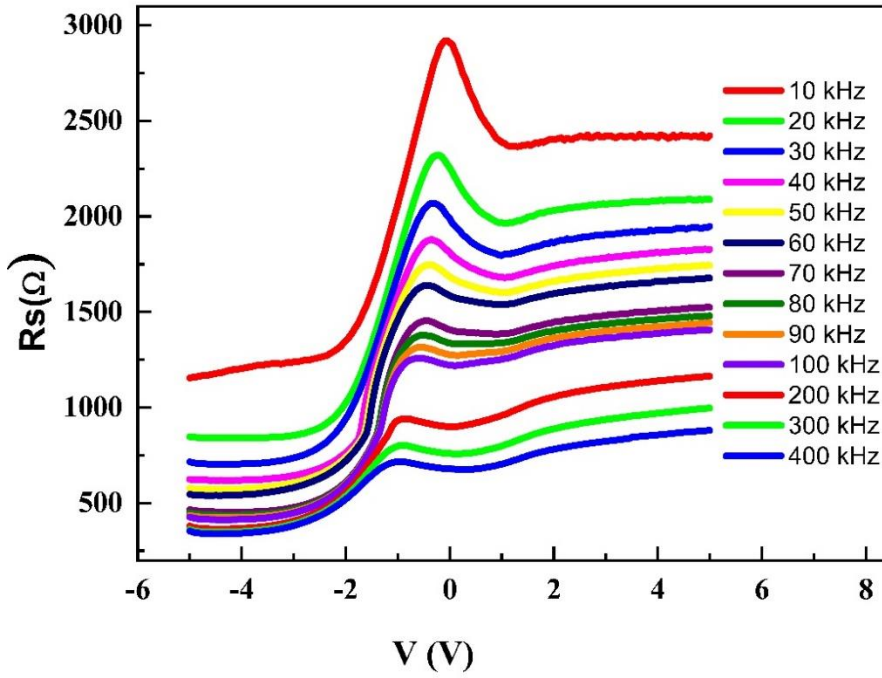
Şekil 4.11. Al/Al₂O₃/p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında (a) C-V, (b) C_c-V grafikleri

Arayüzey tuzak kapasitansının katkısı, yüksek frekans bölgesinde ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Tükenme bölgesi için, tükenme tabakasının oluşmasıyla silisyum kapasitansı arttıkça, birbirleriyle seri oldukları için toplam kapasitans azalır. Ayrıca, C_c-V grafikleri, tükenme bölgesinde bir tepe noktası verir. Bunun nedeni, seri direnç, doping konsantrasyonu ve arayüzey yalıtkan tabakasının kalınlığının mevcut olduğu yasak enerji

boşluğuna yerleştirilmiş arayüzey durumlarıdır [26, 211, 221-223]. Arayüzey durumları, tükenme ve tersinim bölgelerinde dikkat çeker. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, C değerlerinin aksine, ölçülen G değerleri artan frekansla artmaktadır. İletkenlik ($G \sim 1/R$) R_s ile ilgilidir. G 'nin artması, artan frekansla R_s 'nin azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.12. Al/Al₂O₃/p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında (a) G - V , (b) G_c - V grafikleri



Şekil 4.13. Al/Al₂O₃/p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında Rs-V grafiği

Farklı frekanslar için R_s -V grafikleri Şekil 4.13'te sunulmuştur. R_s 'nin doğru beslem ve birikim bölgesindeki gerilime bağlı olmadığı görülmektedir. Ayrıca frekansa bağlı olarak arayüzey yükleri nedeniyle frekans azaldıkça R_s değerleri artmaktadır. Yapının frekans ve gerilime bağlı özelliklerinin elde edilmesinde R_s oldukça önemlidir. Şekil 4.13'te R_s -V eğrileri bir tepe noktası göstermektedir [56]. Tepe yüksekliği, frekansın azaltılmasıyla artar ve tepe noktasının konumu, -1 V'dan 0 V'a doğru bölgenin negatif beslem kısmına kayar. R_s 'nin tepe davranışı, harici bir elektrik alanı altındaki ara katman/yarıiletken arayüzey tuzaklarının veya yeniden sıralamanın ve arayüzde yüzey durumlarında veya arayüzey durumlarında yüklerin yeniden yapılandırılmasının sonucudur. Bu yapıda, ara katman olarak kullanılan Al₂O₃, Si yüzeyindeki kimyasal olarak aktif sarkın bağların etkisini azaltır ve bu da Gr'in büyümesindeki kusurları azaltır. Ayrıca yüzeyin Al₂O₃ ile pasifleştirilmesi ara yüzeyde kalın doğal oksit oluşumunu engeller. Bu nedenle, Al₂O₃ üzerindeki Gr kusurlarının azaltılması, cihazın seri direncini azaltabilir. Böylece, Al₂O₃ tabakası, seri direnci azaltan, yüzey rekombinasyonunu azaltır ve yüzey rekombinasyonunda önemli bir azalmaya neden olan tuzakların yoğunluğunu da önemli ölçüde azaltır. Yani, Si alttaş için taşıyıcı ömrünün iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Elde edilen D_{it} değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur. D_{it} değerleri, $3,89 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ile $0,74 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişmekte ve düşük frekanslardan yüksek frekanslara

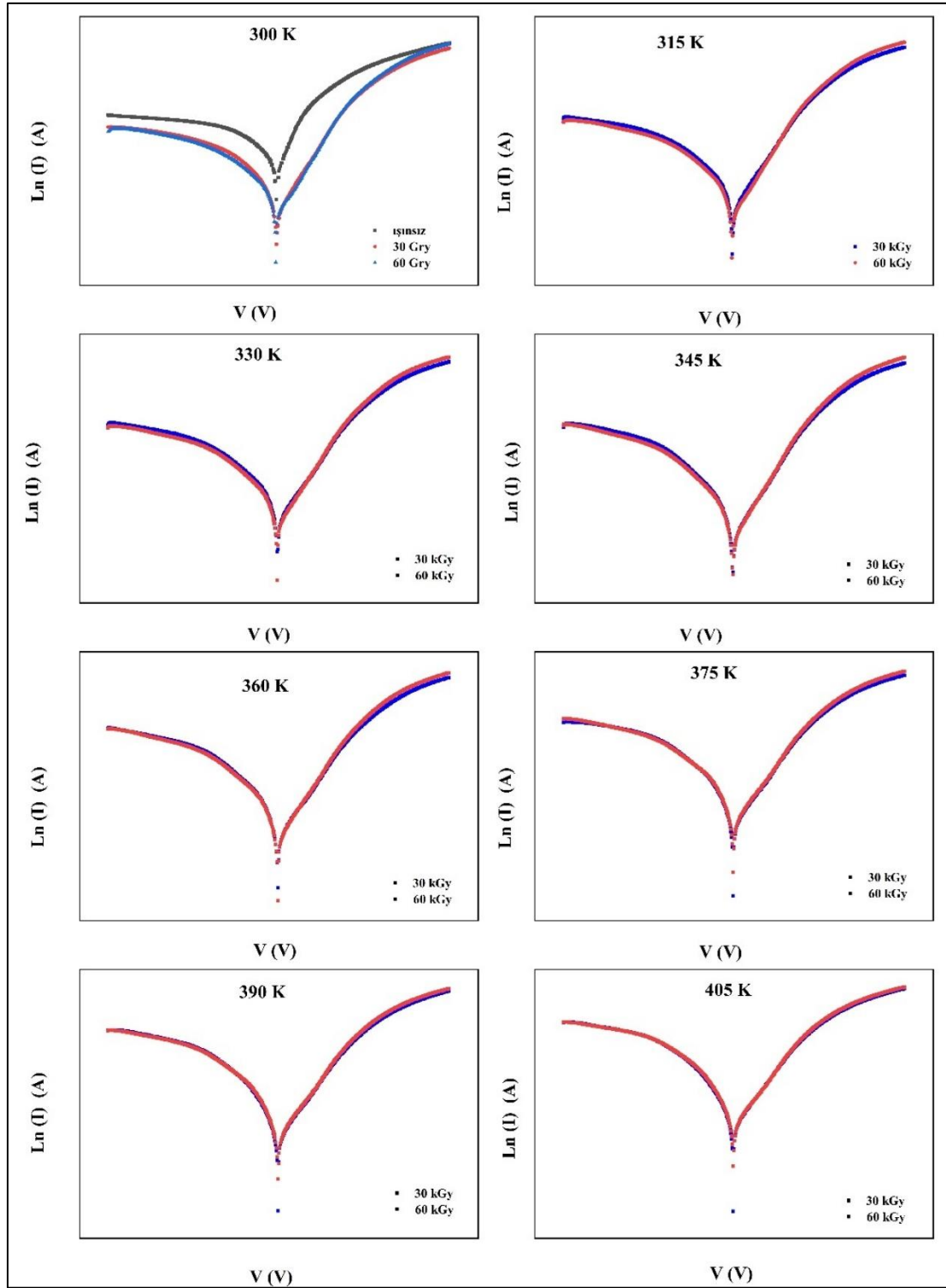
gidildikçe azalma göstermektedir. Bu sonuçlar, AC sinyalini takip etmeyen arayüzey durum yoğunluğunun frekansa bağlı olduğunun ispatıdır.

Çizelge 4.3. Al/Al₂O₃/p-Si yapının 10 kHz-400 kHz frekans aralığında elde edilen D_{it} değerleri

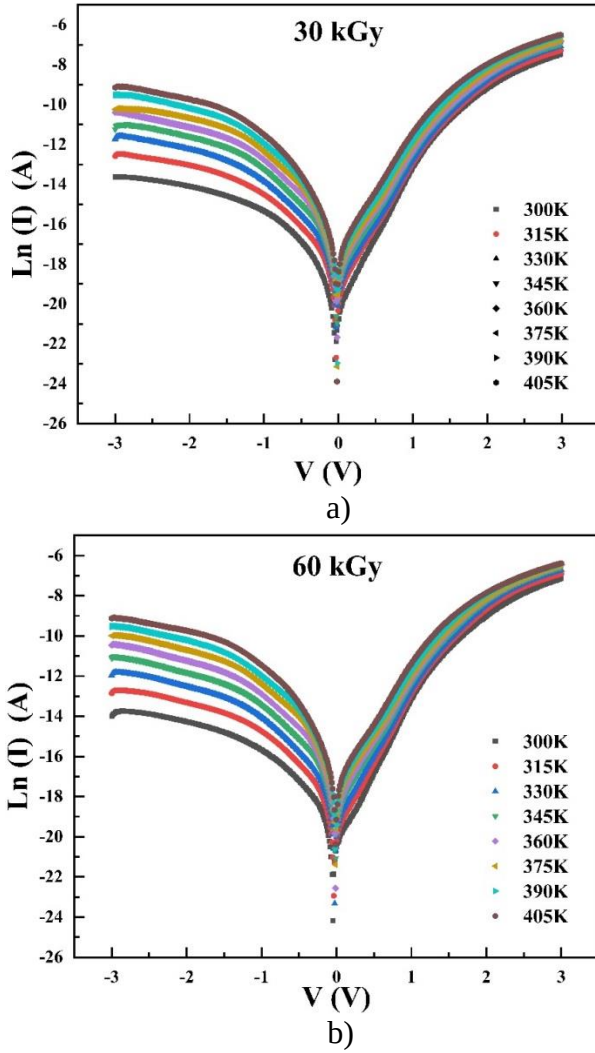
Frekans (kHz)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400
D _{it} (10 ¹³) (eV ⁻¹ cm ⁻²)	3,89	2,75	2,23	1,98	1,77	1,63	1,51	1,47	1,40	1,38	1,07	0,93	0,74

4.3.2. Gama ışının akım-voltaj karakteristiği üzerinde etkisi

Bu çalışmada, γ ışınlamasının Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si 'nin ⁶⁰Co γ -ışınlaması öncesi ve sonrası elektriksel özelliklerini analiz etmek için -3 V ile 3 V arasında I-V ölçümleri yapılmıştır. Yapının I-V ölçümleri 300 K–405 K aralığında yapılmıştır. Yapının elektriksel özelliklerini incelemek için TE teorisi ve Cheung yöntemleri kullanılmıştır. Bölüm 3.2.3'te Al₂O₃/p-Si yapının büyütülmesinin ve bölüm 3.1.3'te Gr'in transferinin detaylı anlatıldığı ve ardından doğrultucu kontakların alınarak oluşturulan Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının 30 kGy ve 60 kGy γ ışınlaması yapıp her ışınlamanın ardından 300 K–405 K sıcaklıklar arasında I-V ölçümü alınmıştır. Bulunan sonuçlar radyasyondan önceki sonuçlarla [21] karşılaştırılmıştır.

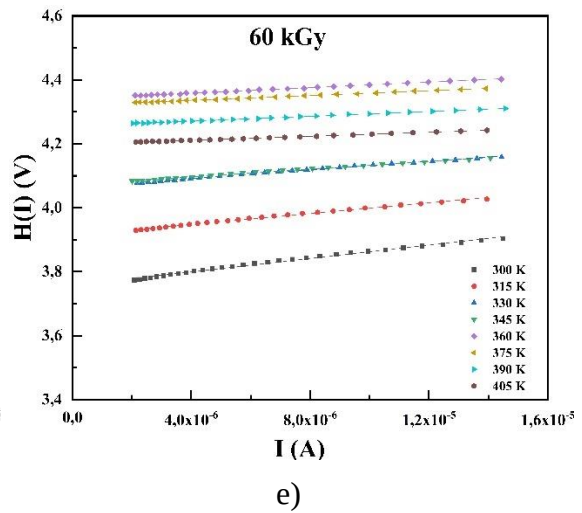
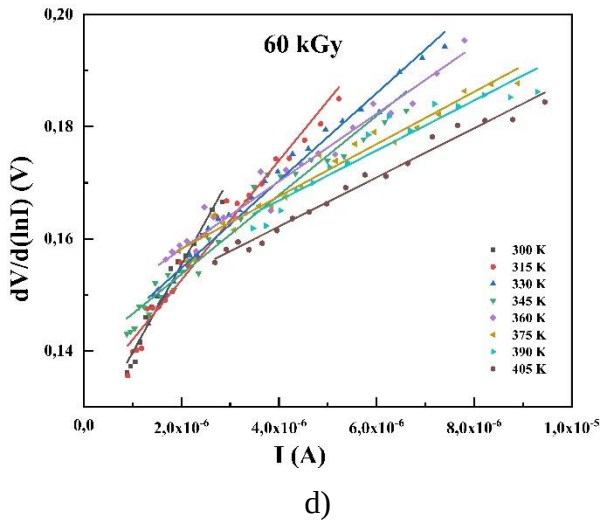
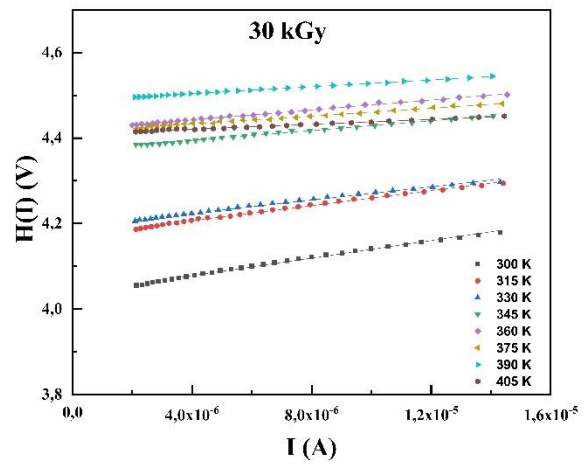
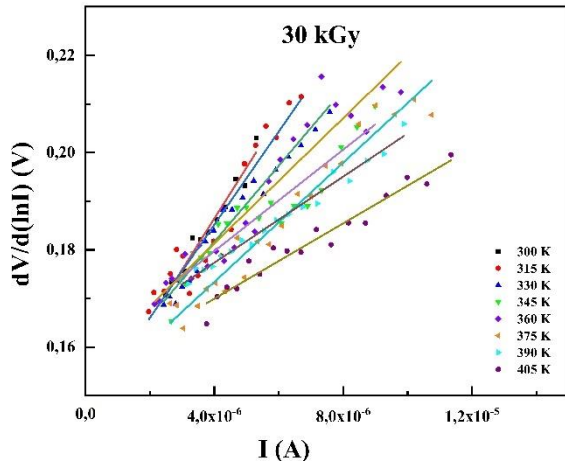
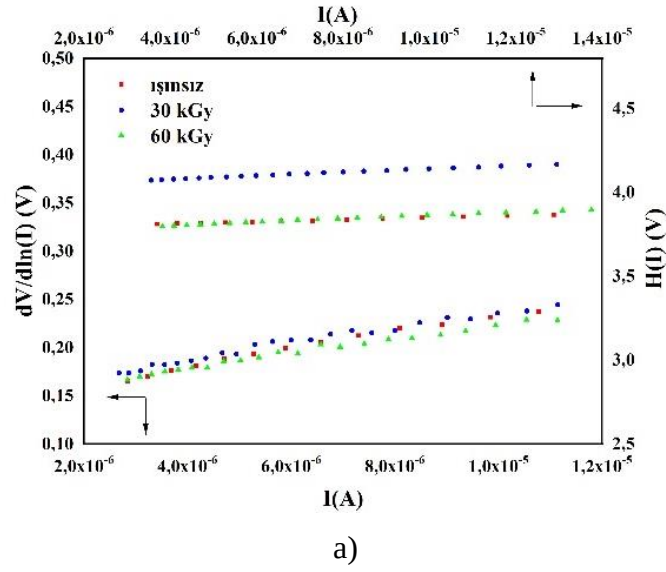


Şekil 4.14. $\text{Al/Gr/Al}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ yapının radyasyonundan önce ve γ -radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) 300 K $\ln(I)$ -V grafiği ve γ -radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) 315 K–405 K arasında değişen sıcaklıklarda $\ln(I)$ -V grafikleri



Şekil 4.15. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının a) 30 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) Ln(I)-V grafiği. b) 60 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) Ln(I)-V grafiği

Şekil 4.14'te 300 K'da γ -ışınlamadan önce ve sonra (30 kGy ve 60 kGy) Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının Ln(I)-V grafiklerini ve farklı sıcaklıklarda ışınlamadan sonra (30 kGy ve 60 kGy) Ln(I)-V grafiklerini gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 4.15, Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının γ -ışınlamasından (30 kGy ve 60 kGy) sonra 315 K-405 K sıcaklık aralığında Ln (I)-V grafiklerini göstermektedir [56]. 300 K'de sırasıyla ışınlama öncesinde, 30 kGy ve 60 kGy'de TE teorisi ile elde edilen n değerleri 3,89, 5,05 ve 6,75 iken, ϕ_b değerleri sırasıyla 0,69 eV, 0,78 eV ve 0,78 eV'dur. γ -ışınlamasından sonra (30 kGy ve 60 kGy) sıcaklık arttıkça ϕ_b değerleri artarken, n değerleri azalmaktadır. 30 kGy ışınlamadan sonra sıcaklık arttıkça n değerleri 5,08 ile 3,78 arasında azalırken, ϕ_b değerleri 0,78 eV ile 0,99 eV arasında artmaktadır. Aynı şekilde 60 kGy radyasyondan sonra n 6,75 ile 4,09 arasında azalırken, ϕ_b değerleri 0,78 eV ile 0,93 eV arasında artmaktadır.

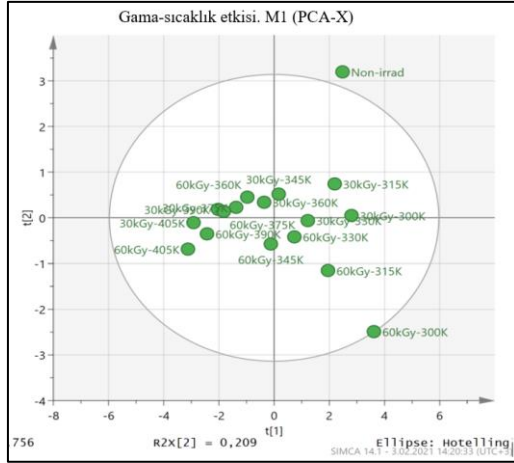


Şekil 4.16. a) Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının 300 K sıcaklıkta γ -radyasyonundan önce (ışımsız) ve radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) akıma bağlı $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ grafikleri. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının; b) ve c) 30 kGy, d) ve e) 60 kGy γ -radyasyonundan sonra sıcaklığa bağlı (315 K-405 K) $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ grafikleri

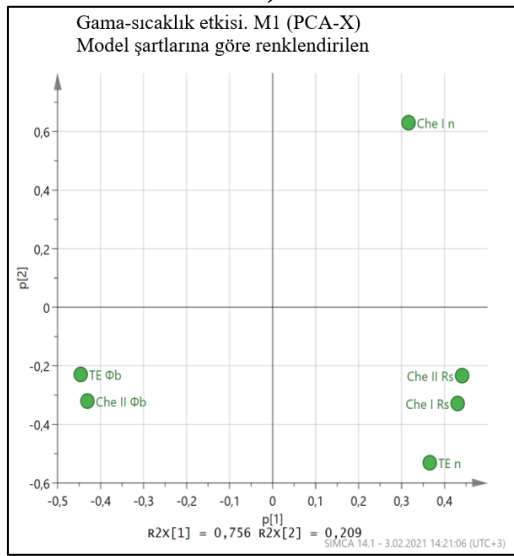
R_s değerleri radyasyon dozu ile doğru orantılıdır. Bu çalışmada R_s değerlerinin 300 K sıcaklıkta ışınlamadan önce 9,12k Ω , 30 kGy ışınlamadan sonra 14,0 k Ω ve 60 kGy ışınlamadan sonra 19,40 k Ω , olduğu bulunmuştur. Ayrıca R_s değerleri gama radyasyonundan sonra (30 kGy ve 60 kGy) sıcaklığa bağlı olarak azalmaktadır.

Çizelge 4.4. TE teorisinden ve Cheung metodlarından elde edilen n , ϕ_b ve R_s değerleri

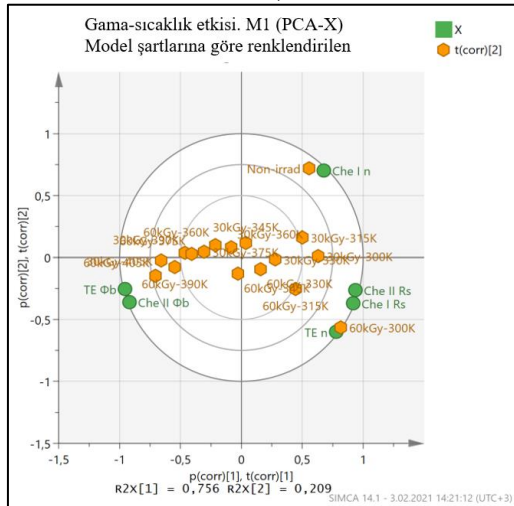
	Sıcaklık (K)	TE			Cheung $dV/d\ln I-I$			Cheung $H(I)-I$		
		n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)
İşınsız	300	3,89	0,69	-	5,54	-	9,12	-	0,68	5,94
30 kGy	300	5,08	0,78	-	5,09	-	14,00	-	0,79	10,20
	315	5,05	0,80	-	5,24	-	10,40	-	0,79	8,79
	330	4,93	0,83	-	4,92	-	10,80	-	0,85	7,80
	345	4,72	0,86	-	5,00	-	7,27	-	0,88	5,76
	360	4,41	0,89	-	4,89	-	7,49	-	0,90	5,52
	375	4,15	0,93	-	4,73	-	5,72	-	0,93	4,52
	390	3,98	0,96	-	4,68	-	4,72	-	0,96	3,84
	405	3,78	0,99	-	4,47	-	3,60	-	0,99	2,90
60 kGy	300	6,75	0,78	-	4,62	-	19,40	-	0,81	10,50
	315	5,84	0,80	-	4,69	-	12,50	-	0,83	8,34
	330	5,17	0,84	-	4,74	-	9,27	-	0,86	6,79
	345	4,80	0,87	-	4,58	-	8,74	-	0,89	6,04
	360	4,36	0,89	-	4,80	-	5,35	-	0,91	4,33
	375	4,09	0,93	-	4,61	-	4,70	-	0,94	3,76
	390	3,90	0,96	-	4,39	-	4,61	-	0,97	3,74
	405	3,79	0,99	-	4,21	-	3,87	-	0,99	3,15



a)



b)



c)

Şekil 4.17. Deneysel sonuçlardaki özellikler için temel bileşen analizinin (principal component analysis-PCA) (PC1'e karşı PC2) puan dağılım grafiği (a), yükleme dağılım grafiği (b) ve biplot (c)

Deneysel sonuçların ayrımı, Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis) (PCA) kullanılarak yapılmıştır. PCA analizinde, ilk iki temel bileşen ($PC1 = \%75,6$ ve $PC2 = \%20,9$) varyansın $\%96,5$ 'ini açıklamıştır ki bu çok iyi bir sonuçtur. PCA, farklı sıcaklıklarda (300 K-405 K) ışınlama öncesi ve sonrası analizlerin [TE , Cheung $dV/d\ln I-I$ (Che I) ve Cheung $H(I)-I$ (Che II) veya n , ϕ_b ve R_s] değerlendirilerek deneysel sonuçlar arasındaki farkları göstermek için uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar için dağılım grafikleri, sırasıyla Şekil 4.17'de gösterilmektedir [56]. Şekil 4.17 a)'dan görülebileceği gibi, ışınlanmamış numune, ışınlanmış numunelerden iyi bir şekilde ayrılmıştır, bu da aralarında bazı farklılıklar olduğunu göstermektedir. Uygulama sıcaklığı arttıkça deney sonuçlarının $PC1$ boyunca sola kaydığı belirlenmiştir. Şekil 4.17 b)'den görülebileceği gibi, TE ϕ_b ve Che II ϕ_b bölgenin sol tarafında birlikte kümelenirken, TE n , Che I R_s ve Che II R_s bölgenin sağ tarafında birlikte kümelenmiştir. Che I n ile ilgili olarak, TE ϕ_b ve Che II ϕ_b ile negatif korelasyon göstermektedir, ancak Che II R_s ve Che I R_s ile pozitif korelasyon göstermektedir. Birinci bileşene ana katkıda bulunanlar TE n , Che I R_s ve Che II R_s 'dir (Şekil 4.17 b); ve bu özelliklerin değerleri $PC1$ boyunca artmaktadır, bu da 300 K'da 60 kGy ışınlanan numunenin bu özelliklerin daha yüksek seviyelerini içerdiğini göstermektedir (Şekil 4.17 c). Öte yandan, ikinci bileşene katkıda bulunan Che I n 'dir (Şekil 4.17 b); ve bu özelliğin değeri $PC2$ boyunca artmaktadır, bu da ışınlanmış numunelerin bu özelliğinin daha yüksek seviyelerini içerdiğini göstermektedir (şekil 6(c)).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Gr'in üstün özelliklerini yarıiletken teknolojisiyle birleştiren bir aygıt geliştirmek üzere, Gr'in üretimindeki zorlukların aşılabilmesi, hibrit yapılarla entegrasyonun sağlanması, üretilen Gr esaslı yapıların elektriksel, yapısal olarak karakterize edilmesi ve gama ışınımının Gr esaslı aygıt performansına etkisinin araştırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Üretilen Gr-Si hibrit yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapının elektriksel özellikleri üzerinde radyasyonun etkisini de incelemek için 30 kGy ve 60 kGy dozlarında γ -radyasyonuna maruz bırakılıp akım gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Gr tabanlı diyotun sıcaklığa ve frekansa bağlı elektriksel özellikleri ve bu yapının elektriksel özelliklerinin radyasyondan nasıl etkilendiği incelenmiştir.

Günümüzde Gr tabanlı foto-diyot yapımında karşılaşılan en temel problemlerden biri üretim aşamasında yüksek performansa ulaşmadaki zorluktur. Fotonu soğuracak nanomalzemelerin, düşük verimli fabrikasyondan dolayı metal elektrotlar arasındaki kısma kısıtlı sayıda konumlandırılabilmesi, foto-diyotun verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorun aynı zamanda soğurma sonrasında uyarılan elektronların taşınmasını da sınırlamaktadır. Bu nedenle, yüksek kontrollü Gr sentezi ile oluşturulacak Gr-Si hibrit fotodiyot cihaz tasarımı, aygıt performansını arttırabilir.

Bu çalışmada, diğer yöntemlere göre tek tabakalı Gr nanotabakalar oluşturmada daha homojen büyütme sağladığı için CVD yöntemi tercih edilmiştir. Gr, CVD yöntemiyle %99,9 saflıkta 2 cm×2 cm Cu folyo üzerine büyütülmüştür. Büyütme sırasında karbon kaynağı olarak CH₄ gazı kullanılmıştır. Büyütme işleminin ardından Gr, ilgili alttaş üzerine ıslak transfer tekniği kullanılarak transfer edilmiştir. Transfer süreci Poly(methyl methacrylate (PMMA)/FeCl₃ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CVD yöntemiyle büyütülen Gr filmin kalitesi ve tabaka sayısının belirlenmesi için Raman spektrometresi kullanılmıştır. CVD yöntemi ile elde edilen Gr filmlerin 2D ve G pik şiddet oranları - I_{2D}/I_G- sırasıyla 2,27, 2,01 ve 1,78 olarak bulunmuştur. CVD ile büyütülmüş Gr'in transferinin doğru bir şekilde gerçekleştiğini görmek için TEM analizi yapıldı. TEM analizinden, Gr'in alttaş olarak kullanılan p-Si üzerine mükemmel bir şekilde transfer edildiğini, kırışıklıkların (düzensizliklerin) olmadığını gördük. Böylece tez çalışmamızdaki hedefimize ulaşabildiğimizi; Gr'in üretimindeki zorlukların aşılabildiğini, hibrit yapılarla

entegrasyonun sağlanabildiğini, tabaka sayısının da istenen aralıkta ayarlanabileceğini gördük.

Üretilen Al/ZnO/p-Si Schottky bariyer yapılarının elektriksel özellikleri TE teorisi, Norde fonksiyonu ve Cheung yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Bu yapıların I-V özellikleri karanlıkta ve oda sıcaklığında ölçülmüştür. ZnO filminin Si alttaşı üzerindeki derinlik profili, SIMS ile analiz edilmiştir. Analizlerden hem Zn hem de O'nun dağılımının, elde edilen filmin derinliği boyunca tek tip olduğu ve filmin sabit stokiometriye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca AFM analizinden, numunenin $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ tarama alanına sahip 3D ve 2D AFM görüntülerinden, yüzeyinin 3,17 nm pürüzlülükle nano ölçekte oldukça homojen olduğu görülmüştür. Üç diyot için geleneksel TE yönteminden ϕ_b ve n değerleri sırasıyla D1 diyot için 0,73 eV ve 1,44, D2 diyot için 0,73 eV ve 1,75 ve D3 diyot için 0,72 eV ve 1,64 olarak elde edilmiştir. Cheung yöntemi ile belirlenen ϕ_b değerleri, D1 için 0,72 eV, D2 için 0,82 eV ve D3 için 0,77 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, yüksek derecede idealize edilmiş $n=1$ durumuyla sınırlı olan Norde fonksiyonundan elde edilen ϕ_b TE yönteminkilerle tam olarak eşleşmektedir. Ayrıca bu çalışmada ölçülen arayüzey durum yoğunluklarının cihazın performansı için yeterli olduğu görülmektedir. Al/ZnO/p-Si (MIS) yapısının kapasitans-voltaj (C-V) özellikleri incelendiğinde, elde edilen D_{it} değerleri frekansa bağlı olarak çeşitli sıcaklıklarda azalmaktadır. Hem G hem de C'nin düşük frekansa çok duyarlı olduğu görülmektedir. Öte yandan, G, C ve R_s 'nin, arayüzey durumlarının kesintisiz dağılımı nedeniyle özellikle birikim bölgesinde artan frekansla ters orantılı olduğu ve sıcaklığın arayüzey koşullarını değiştirdiği görülmektedir. Özellikle birikimdeki kapasitans ve iletkenlik değerleri sıcaklık arttıkça azalmakta, belli bir noktadan sonra sıcaklıkla doğru orantılı olmaktadır. Sıcaklık arayüzey durumlarını değiştirdikçe, sıcaklık arttıkça grafiklerdeki R_s tepe değerleri artmaktadır. ALD tekniğiyle biriktirdiğimiz Al/ZnO/p-Si yapısı, Schottky diyotların elektriksel performansı için düşük arayüzey gereksinimlerini karşılamaktadır. Elde edilen sonuçlar, üretilen diyotun NIR aktif Schottky tabanlı fotodedektör uygulamaları için kullanılabileceğini göstermiştir.

Üretilen Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının frekansa duyarlı kapasitans/iletkenlik-voltaj (C/G-V) özelliklerini araştırmak için, CVD yöntemiyle Al₂O₃/p-Si üzerine nanoyapılı ince bir Gr ince film biriktirilmiştir. Üretilen Al/Gr/Al₂O₃/p-Si yapısının elektriksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. C-V ve G-V özellikleri, 10 kHz–400 kHz frekans aralığında analiz edilmiştir. Frekansın azaldıkça, R_s tepe yüksekliğinin arttığı ve tepe noktasının konumu, -1

V'dan 0 V'a doğru kaydığı görülmüştür. R_s 'nin tepe davranışı, harici bir elektrik alanı altındaki ara katman/yarıiletken arayüzey tuzaklarının veya arayüzey durumlarında yüklerin yeniden yapılandırılmasının sonucudur. D_{it} değerlerinin, $3,89 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $0,74 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değiştiği ve düşük frekanslardan yüksek frekanslara gidildikçe bu değerlerin azaldığı görülmüştür. Bu ölçümler, ayrıca G ve C değerlerinin hem frekansa hem de gerilime bağlı olduğunu göstermiştir. C ve G değerleri R_s etkisi ortadan kaldırılarak düzeltilmiştir. Frekans arttıkça D_{it} değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar, arayüzey durumlarının ve seri direncin yapının elektriksel özellikleri üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğuna işaret etmektedir. Gr sayesinde cihazın elektriksel direncinin büyük ölçüde düştüğü, kapasitansının yükseldiği görülmüştür. Bu çalışma, Gr/ Al_2O_3 ara katmanının yeni Gr yalıtkan-yarıiletken cihazlar için MIS tabanlı bir fotodiyot olarak tercih edilebileceğini göstermektedir.

Üretilen Al/Gr/ Al_2O_3 /p-Si yapısını modifiye edebilmek için yapı, γ -ışınımına maruz bırakılmıştır. Radyasyon ve sıcaklığa bağlı I-V analizi için TE teorisi ve Cheung'un yöntemleri kullanılmıştır. Radyasyonsuz [21] ve 30 kGy ve 60 kGy radyasyona maruz kalan Al/Gr/ Al_2O_3 /p-Si yapısındaki I-V ölçümlerine göre, elektriksel özelliklerin radyasyona ve sıcaklığa duyarlı olduğu belirlenmiştir. Gama ışımasına maruz kalan yapıda kristal örgü, elektriksel olarak aktif yapısal kusurların oluşması nedeniyle yarıiletkenlerin elektronik özelliklerini değiştirmiştir. γ ışınımının, arayüzey durum yoğunluğundaki değişiklikler, boşluklara ve oksit/yarıiletken arayüzeyinde örgü kusurlarının oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. 300 K'de sırasıyla ışınlama öncesinde ve sonrasında (30 kGy ve 60 kGy) TE teorisi ile elde edilen n değerleri 3,89, 5,05 ve 6,75 iken, ϕ_b değerleri sırasıyla 0,69 eV, 0,78 eV ve 0,78 eV olarak bulunmuştur. Cheung metodundan 300 K'de hesaplanan n değerleri 5,54, 5,09 ve 4,62'dir. ϕ_b değerleri ise 0,68, 0,69 ve 0,81 eV olarak elde edilmiştir. Ek olarak, 300 K'de, ışınlamadan önce ve sonra (30 kGy ve 60 kGy); R_s değerlerinin sırasıyla, 9,12k Ω , 14,0 k Ω ve 19,40 k Ω , olduğu ve sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Yapının n, ϕ_b ve R_s büyük ölçüde değerlendirilen yöntemle ilgili olmakla birlikte, yapının radyasyondan ve radyasyon miktarından etkilendiği görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi [222], bozunma ciddi şekilde sıcaklığa da bağlıdır. Çoğu elektrikli cihaz için kabul edilebilir çalışma ortamı sıcaklığı neredeyse 310 K'dir. Cihazlar 310 K'yi aşarsa veya aşırı soğutma olursa, yapıların arayüzey durumlarında ve kristal yapıda kusurlara yol açabilir. Bu nedenle, ışınlama ve sıcaklıkla, malzemeyi

kontrol etme yeteneğinin gelecekteki birçok uygulama için sayısız avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D.-e., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V. and Firsov, A.A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306 (5696), 666-669.
2. Chen, C.C., Aykol, M., Chang, C.C., Levi, A. and Cronin, S.B. (2011). Graphene-silicon Schottky diodes. *Nano Letters*, 11 (5), 1863-1867.
3. Miao, X., Tongay, S., Petterson, M.K., Berke, K., Rinzler, A.G., Appleton, B.R. and Hebard, A.F. (2012). High-efficiency Gr solar cells by chemical doping. *Nano Letters*, 12, 2745.
4. Li, X., Zhu, H., Wang, K., Cao, A., Wei, J., Li, C., Jia, Y., Li, Z., Li, X. and Wu, D. (2010). Graphene-On-Silicon Schottky Junction Solar Cells. *Advanced Materials*, 22 (25), 2743-2748.
5. Akay, D. (2018). Trigonal warping and photo-induced effects on zone boundary phonon in monolayer graphene. *Superlattices and Microstructures*, 117, 18-24.
6. Akay, D. (2021). Manipulating electronic dynamics of 8-Pmmn borophene with surface optical phonons. *Semiconductor Science and Technology*, 36 (4), 045001.
7. Di Bartolomeo, A. (2016). Graphene Schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 606, 1-58.
8. Ki Min, B., Kim, S.K., Jun Kim, S., Ho Kim, S., Kang, M.A., Park, C.Y., Song, W., Myung, S., Lim, J. and An, K.S. (2015). Electrical double layer capacitance in a graphene-embedded Al₂O₃ Gate Dielectric. *Scientific Reports*, 5, 16001.
9. Luongo, G., Di Bartolomeo, A., Giubileo, F., Chavarin, C.A. and Wenger, C. (2018). Electronic properties of graphene/p-silicon Schottky junction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51 (25), 255305.
10. Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R. and Kang, Y.S. (2010). Synthesis of graphene and its applications: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 35 (1), 52-71.
11. Bolotin, K.I., Sikes, K.J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., Kim, P. and Stormer, H.L. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146 (9), 351-355.
12. Parlak, O., Turner, A.P.F. and Tiwari, A. (2015). pH-induced on/off-switchable graphene bioelectronics. *Journal of Materials Chemistry B*, 3 (37), 7434-7439.
13. Li, S.-M., Wang, Y.-S., Hsiao, S.-T., Liao, W.-H., Lin, C.-W., Yang, S.-Y., Tien, H.-W., Ma, C.-C.M. and Hu, C.-C. (2015). Fabrication of a silver nanowire-reduced graphene oxide-based electrochemical biosensor and its enhanced sensitivity in the simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine, and uric acid. *Journal of Materials Chemistry C*, 3 (36), 9444-9453.

14. Choi, Y.J., Woo, H.J., Kim, S., Sun, J., Kang, M.S., Song, Y.J. and Cho, J.H. (2020). Schottky junction photodiode based on graphene—organic semiconductor heterostructure. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 233-238.
15. Li, Y., Zhang, J. and Zhang, H. (2021). Effect of annealing on electrical characteristics of graphene/Al-Zr co-doped ZnO Schottky contact. *Thin Solid Films*, 717, 138447.
16. Reina, A., Son, H., Jiao, L., Fan, B., Dresselhaus, M.S., Liu, Z. and Kong, J. (2008). Transferring and identification of single- and few-layer graphene on arbitrary Substrates. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112 (46), 17741-17744.
17. Brus, V.V., Maslyanchuk, O.L., Solovan, M.M., Maryanchuk, P.D., Fodchuk, I., Gnatyuk, V.A., Vakhnyak, N.D., Melnychuk, S.V. and Aoki, T. (2019). Graphene/semi-insulating single crystal CdTe Schottky-type heterojunction X- and γ -Ray Radiation Detectors. *Scientific Reports*, 9 (1), 1065.
18. Chen, Q., Sun, T., Song, X., Ran, Q., Yu, C., Yang, J., Feng, H., Yu, L. and Wei, D. (2017). Flexible electrochemical biosensors based on graphene nanowalls for the real-time measurement of lactate. *Nanotechnology*, 28 (31), 315501.
19. Yan, H. (2015). Bilayer graphene: physics and application outlook in photonics. *Nanophotonics*, 4 (2), 115-127.
20. Kaymak, N., Efil, E., Seven, E., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S. and Öz Orhan, E. (2018). Electrical characteristics analyses of zinc-oxide based MIS structure grown by atomic layer deposition. *Materials Research Express*, 6 (2), 026309.
21. Efil Kutluoğlu, E., Kaymak, N., Seven, E., Öz Orhan, E., Bayram, Ö., Bilge Ocak, S. and Tataroğlu, A. (2020). Current–voltage analyses of graphene-based structure onto Al₂O₃/p-Si using various methods. *Vacuum*, 181, 109654.
22. Kaymak, N., Öz Orhan, E., Bayram, Ö. and Bilge Ocak, S. (2021). Dielectric characteristics and electrical conductivity behavior of graphene/Al₂O₃/p-type silicon structure. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123878.
23. Bartolomeo, A.D., Luongo, G., Iemmo, L., Urban, F. and Giubileo, F. (2018). Graphene–silicon Schottky diodes for photodetection. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 17 (6), 1133-1137.
24. Riazimehr, S., Kataria, S., Bornemann, R., Haring Bolívar, P., Ruiz, F.J.G., Engström, O., Godoy, A. and Lemme, M.C. (2017). High photocurrent in gated graphene–silicon hybrid photodiodes. *ACS Photonics*, 4 (6), 1506-1514.
25. Selvi, H. (2019). *CMOS-compatible graphene-silicon photodetectors*, Doctoral Thesis, The University of Manchester in the Faculty of Science and Engineering. ProQuest Dissertations Publishing, Manchester, UK.
26. Kaymak, N., Bayram, Ö., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S. and Öz Orhan, E. (2020). Electrical properties of graphene/silicon structure with Al₂O₃ interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31 (12), 9719-9725.

27. Singh, A., Uddin, M.A., Sudarshan, T. and Koley, G. (2014). Tunable reverse-biased graphene/silicon heterojunction schottky diode sensor. *Small*, 10 (8), 1555-1565.
28. Tataroğlu, A. (2006). Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures. *Microelectronic engineering*, 83 (11-12), 2551-2557.
29. Efil, E., Kaymak, N., Seven, E., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S. and Öz Orhan, E. (2019). Frequency dependent dielectric properties of atomic layer deposition grown zinc-oxide based MIS structure. *Physica B: Condensed Matter*, 568, 31-35.
30. Zhang, X., Zhang, L., Ahmed, Z. and Chan, M. (2018). Origin of nonideal graphene-silicon Schottky junction. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65 (5), 1995-2002.
31. Tomer, D., Rajput, S., Hudy, L., Li, C. and Li, L. (2015). Inhomogeneity in barrier height at graphene/Si (GaAs) Schottky junctions. *Nanotechnology*, 26 (21), 215702.
32. Luongo, G., Giubileo, F., Iemmo, L. and Di Bartolomeo, A. (2018). The role of the substrate in Graphene/Silicon photodiodes. *Journal of Physics: Conference Series*, 956 (1), 012019.
33. Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T. and Ferrari, A. (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nature photonics*, 4 (9), 611-622.
34. Suntola, T. and Antson, J. (1977). 4,058,430. Patent, U.S.
35. Suntola, T. (1989). Atomic layer epitaxy. *Materials Science Reports*, 4 (5), 261-312.
36. Suntola, T. (1992). Atomic layer epitaxy. *Thin Solid Films*, 216 (1), 84-89.
37. Bedair, S.M., Tischler, M.A., Katsuyama, T., El- Masry, N.A., Leys, M.R. and Veenvliet, H. (1985). Atomic layer epitaxy of III- V binary compounds. *Applied Physics Letters*, 47 (1), 51-53.
38. Nishizawa, J.i., Abe, H. and Kurabayashi, T. (1985). Molecular layer epitaxy. *Journal of The Electrochemical Society*, 132 (5), 1197-1200.
39. Tischler, M.A. and Bedair, S.M. (1990). *Atomic layer epitaxy* (T. Suntola and M. Simpson, Eds.) Blackie, Glasgow.
40. Leskelä, M., Mattinen, M. and Ritala, M. (2019). Review article: atomic layer deposition of optoelectronic materials. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 37 (3), 030801.
41. Tynell, T. and Karppinen, M. (2014). Atomic layer deposition of ZnO: a review. *Semiconductor Science and Technology*, 29 (4), 043001.

42. Hwang, H.S. (2012). Atomic layer deposition for microelectronic applications. Pinna, N. and Knez, M. (Eds.), *Atomic layer deposition of nanostructured materials*. Weinheim, Germany. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA. 159-188.
43. Aaltonen, T. (2005). *Atomic layer deposition of noble metal thin films*, Doctoral Thesis, University of Helsinki Department of Chemistry, Helsinki.
44. Pozzovivo, G., Kuzmik, J., Golka, S., Schrenk, W., Strasser, G., Pogany, D., Cico, K., Tapajna, M., Fröhlich, K., Carlin, J.-F., Gonschorek, M., Feltin, E. and Grandjean, N. (2007). Gate insulation and drain current saturation mechanism in InAlN/GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistors. *Applied Physics Letters*, 91, 043509.
45. Fang, Z.-Q., Look, D.C., Kim, D. and Adesida, I. (2005). Traps in AlGaN/GaN/SiC heterostructures studied by deep level transient spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 87 (18), 182115.
46. Gaffey, B., Guido, L.J., Wang, X. and Ma, T. (2001). High-quality oxide/nitride/oxide gate insulator for GaN MIS structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 48 (3), 458-464.
47. Bülbül, M., Zeyrek, S., Altındal, S. and Yüzer, H. (2006). On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 83, 577-581.
48. Rhoderick, E.H. (1982). Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I-Solid-State and Electron Devices*, 129 (1), 1.
49. Sullivan, J., Tung, R., Pinto, M. and Graham, W. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal of Applied Physics*, 70 (12), 7403-7424.
50. Cowley, A. and Sze, S. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36 (10), 3212-3220.
51. Goetzberger, A. and Sze, S.M. (1969). Metal-insulator-semiconductor (MIS) physics. Wolfe, R. (Eds.), *Applied solid state science: advances in materials and device research*. New York and London. Academic Press. 153-238.
52. Vul, A.Y. and Dideikin, A. (1993). Photodetectors based on metal-tunnel insulator-semiconductor structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 39 (1), 7-18.
53. Ligenza, J. and Spitzer, W. (1960). The mechanisms for silicon oxidation in steam and oxygen. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 14, 131-136.
54. Öz Orhan, E., Efil Kutluoğlu, E., Bayram, Ö., Kaymak, N., Berberoğlu, H., Candemir, O., Pavlov, I. and Bilge Ocak, S. (2021). 3D-graphene-laser patterned p-type silicon Schottky diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 121, 105454.

55. Efil Kutluoğlu, E., Öz Orhan, E., Tataroğlu, A. and Bayram, Ö. (2021). Double-exponential current-voltage (I-V) behavior of bilayer graphene-based Schottky diode. *Physica Scripta*, 96 (12), 125836.
56. Kaymak, N., Öz Orhan, E. and Bilge Ocak, S. (2021). The impact of gamma-ray irradiation on temperature-sensitive electrical characteristics of graphene/Al₂O₃/p-type Si structure. *Physica Scripta*, 96 (12), 125301.
57. Efil Kutluoğlu, E., Öz Orhan, E., Bayram, Ö. and Bilge Ocak, S. (2021). Gamma-ray irradiation effects on capacitance and conductance of graphene-based Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 621, 413306.
58. Vali, I.P., Shetty, P.K., Mahesha, M.G., Keshav, R., Sathe, V.G., Phase, D.M. and Choudhary, R.J. (2018). Gamma irradiation effects on Al/n-Si Schottky junction properties. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 436, 191-197.
59. Vali, I.P., Shetty, P.K., Mahesha, M.G., Petwal, V.C., Dwivedi, J., Phase, D.M. and Choudhary, R.J. (2020). Electron and gamma irradiation effects on Al/n-4H-SiC Schottky contacts. *Vacuum*, 172, 109068.
60. Sharma, C., Visvkarma, A.K., Laishram, R., Kumar, A., Rawal, D.S., Vinayak, S. and Singh, R. (2020). Effect of γ -ray irradiation on Schottky and ohmic contacts on AlGaIn/GaN hetero-structures. *Microelectronics Reliability*, 105, 113565.
61. Tian, W., Li, W., Yu, W. and Liu, X. (2017). A Review on lattice defects in graphene: types, generation, effects and regulation. *Micromachines*, 8 (5), 163.
62. Tataroğlu, A. and Altındal, Ş. (2006). Electrical characteristics of ⁶⁰Co γ -ray irradiated MIS Schottky diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 252 (2), 257-262.
63. Birkan Selçuk, A., Bilge Ocak, S. and Faruk Yüksel, Ö. (2008). Effects of gamma irradiation on dielectric characteristics of SnO₂ thin films. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 594 (3), 395-399.
64. Kaymaz, A., Evcin Baydilli, E., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Evaluation of gamma-irradiation effects on the electrical properties of Al/(ZnO-PVA)/p-Si type Schottky diodes using current-voltage measurements. *Radiation Physics and Chemistry*, 183, 109430.
65. Akgül, F.D., Eymur, S., Akın, Ü., Yüksel, Ö.F., Karadeniz, H. and Tuğluoğlu, N. (2021). Investigation of Schottky emission and space charge limited current (SCLC) in Au/SnO₂/n-Si Schottky diode with gamma-ray irradiation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 (12), 15857-15863.
66. Xu, Y., Bi, J., Xi, K. and Liu, M. (2019). The effects of γ -ray irradiation on graphene/n-Si Schottky diodes. *Applied Physics Express*, 12 (6), 061004.

67. Seven, E., Öz Orhan, E. and Bilge Ocak, S. (2021). Changes in frequency-dependent dielectric features of monolayer graphene/silicon structure due to gamma irradiation. *Physica Scripta*, 96 (12), 125852.
68. Shlimak, I. and Kaveh, M. (2020). Raman spectra in irradiated graphene: line broadening, effects of aging and annealing. *Graphene*, 9 (02), 13.
69. Kulkarni, S., Nagabhushana, B., Parvatikar, N., Shivakumara, C. and Damle, R. (2011). Effect of γ -irradiation on the dielectric and conductivity properties of nanowollastonite. *International Scholarly Research Network ISRN Materials Science*, 2011, 1-6.
70. Buchowicz, G., Stone, P.R., Robinson, J.T., Cress, C.D., Beeman, J.W. and Dubon, O.D. (2011). Correlation between structure and electrical transport in ion-irradiated graphene grown on Cu foils. *Applied Physics Letters*, 98 (3), 032102.
71. Jorio, A., Lucchese, M.M., Stavale, F., Ferreira, E.H.M., Moutinho, M.V., Capaz, R.B. and Achete, C.A. (2010). Raman study of ion-induced defects in N-layer graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 22 (33), 334204.
72. Fan, L., Bi, J., Xi, K., Yan, X., Xu, Y. and Ji, L. (2021). Impact of γ -ray Irradiation on Graphene-based Hall Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 21 (14), 16100 - 16106.
73. Schedin, F., Geim, A.K., Morozov, S.V., Hill, E., Blake, P., Katsnelson, M. and Novoselov, K.S. (2007). Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Materials*, 6 (9), 652-655.
74. Kim, K., Choi, J.-Y., Kim, T., Cho, S.-H. and Chung, H.-J. (2011). A role for graphene in silicon-based semiconductor devices. *Nature*, 479 (7373), 338-344.
75. Schneider, G.F., Kowalczyk, S.W., Calado, V.E., Pandraud, G., Zandbergen, H.W., Vandersypen, L.M.K. and Dekker, C. (2010). DNA translocation through graphene Nanopores. *Nano Letters*, 10 (8), 3163-3167.
76. Yin, Z., Sun, S., Salim, T., Wu, S., Huang, X., He, Q., Lam, Y.M. and Zhang, H. (2010). Organic photovoltaic devices using highly flexible reduced graphene oxide films as transparent electrodes. *ACS Nano*, 4 (9), 5263-5268.
77. Castro Neto, A.H., Guinea, F., Peres, N.M.R., Novoselov, K.S. and Geim, A.K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81 (1), 109-162.
78. Katsnelson, M.I. (2007). Graphene: carbon in two dimensions. *Materials Today*, 10 (1), 20-27.
79. Geim, A.K. and Novoselov, K.S. (2009). The rise of graphene. Rodgers, P. (Eds.), *Nanoscience and technology*. Singapore and London. World Scientific & Macmillan. 11-19.
80. Lee, N.J., Yoo, J.W., Choi, Y.J., Kang, C.J., Jeon, D.Y., Kim, D.C., Seo, S. and Chung, H.J. (2009). The interlayer screening effect of graphene sheets investigated by kelvin probe force microscopy. *Applied Physics Letters*, 95 (22), 222107.

81. Freire Soler, V.M. (2014). *Fabrication and characterization of macroscopic graphene layers on metallic substrates*. Doctoral Thesis, Universitat de Barcelona Departament de Física Aplicada i Òptica, Barcelona
82. Öz Orhan, E. and Yazıcı, D. (2020). Bilimsel çalışmalarda ve teknolojik uygulamalarda grafen. Neşeli, S. (Eds.), *Enerji araştırmaları*. Ankara / Turkey. İksad. 125-163.
83. Jakob, M.H. (2016). *Experimental methods for implementing graphene contacts to finite bandgap semiconductors*, Doctoral, University of Copenhagen and University of Chinese Academy of Sciences Nano Physics, Copenhagen.
84. Geim, A.K. and MacDonald, A.H. (2007). Graphene: Exploring carbon flatland. *Physics Today*, 60 (8), 35-41.
85. Molitor, F., Güttinger, J., Stampfer, C., Dröscher, S., Jacobsen, A., Ihn, T. and Ensslin, K. (2011). Electronic properties of graphene nanostructures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23 (24), 243201.
86. Krogstrup, P., Jørgensen, H.I., Johnson, E., Madsen, M.H., Sørensen, C.B., i Morral, A.F., Aagesen, M., Nygård, J. and Glas, F. (2013). Advances in the theory of III-V nanowire growth dynamics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46 (31), 313001.
87. Pang, S., Hernandez, Y., Feng, X. and Müllen, K. (2011). Graphene as transparent electrode material for organic electronics. *Advanced Materials*, 23 (25), 2779-2795.
88. Bayram, Ö., İğman, E. and Şimşek, Ö. (2019). CVD ve PECVD tekniği kullanılarak bakır folyolar üzerinde grafen nanoyapıların elde edilmesi ve karakterizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 1126-1134.
89. Allen, M.J., Tung, V.C. and Kaner, R.B. (2010). Honeycomb carbon: a review of graphene. *Chemical Reviews*, 110 (1), 132-145.
90. Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W. and Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321 (5887), 385-388.
91. Nair, R.R., Blake, P., Grigorenko, A.N., Novoselov, K.S., Booth, T.J., Stauber, T., Peres, N.M.R. and Geim, A.K. (2008). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 320 (5881), 1308-1308.
92. Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E., Bacsá, R.R. and Rousset, A. (2001). Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes. *Carbon*, 39 (4), 507-514.
93. Lee, H.C., Liu, W.-W., Chai, S.-P., Mohamed, A.R., Aziz, A., Khe, C.-S., Hidayah, N.M. and Hashim, U. (2017). Review of the synthesis, transfer, characterization and growth mechanisms of single and multilayer graphene. *RSC Advances*, 7 (26), 15644-15693.

94. Edwards, R.S. and Coleman, K.S. (2013). Graphene synthesis: relationship to applications. *Nanoscale*, 5 (1), 38-51.
95. Lee, X.J., Hiew, B.Y.Z., Lai, K.C., Lee, L.Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S. and Rigby, S. (2019). Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 163-180.
96. Li, X., Cai, W., An, J., Kim, S., Nah, J., Yang, D., Piner, R., Velamakanni, A., Jung, I., Tutuc, E., Banerjee, S.K., Colombo, L. and Ruoff, R.S. (2009). Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, 324 (5932), 1312-1314.
97. Bhuyan, M.S.A., Uddin, M.N., Islam, M.M., Bipasha, F.A. and Hossain, S.S. (2016). Synthesis of graphene. *International Nano Letters*, 6 (2), 65-83.
98. Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Katsnelson, M.I., Grigorieva, I.V., Dubonos, S.V. and Firsov, A.A. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438, 197-200.
99. Novoselov, K. and Neto, A.C. (2012). Two-dimensional crystals-based heterostructures: materials with tailored properties. *Physica Scripta*, 2012 (T146), 014006.
100. Parvez, K., Wu, Z.-S., Li, R., Liu, X., Graf, R., Feng, X. and Müllen, K. (2014). Exfoliation of graphite into graphene in aqueous solutions of inorganic salts. *Journal of the American Chemical Society*, 136 (16), 6083-6091.
101. Soldano, C., Mahmood, A. and Dujardin, E. (2010). Production, properties and potential of graphene. *Carbon*, 48 (8), 2127-2150.
102. Berger, C., Song, Z., Li, T., Li, X., Ogbazghi, A.Y., Feng, R., Dai, Z., Marchenkov, A.N., Conrad, E.H., First, P.N. and de Heer, W.A. (2004). Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108 (52), 19912-19916.
103. Hass, J., de Heer, W.A. and Conrad, E.H. (2008). The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20 (32), 323202.
104. Moreno-Bárceñas, A., Perez-Robles, J.F., Vorobiev, Y.V., Ornelas-Soto, N., Mexicano, A. and García, A.G. (2018). Graphene synthesis using a CVD reactor and a discontinuous feed of gas precursor at atmospheric pressure. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 3457263.
105. Liang, X., Sperling, B.A., Calizo, I., Cheng, G., Hacker, C.A., Zhang, Q., Obeng, Y., Yan, K., Peng, H., Li, Q., Zhu, X., Yuan, H., Hight Walker, A.R., Liu, Z., Peng, L.m. and Richter, C.A. (2011). Toward clean and crackless transfer of graphene. *ACS Nano*, 5 (11), 9144.

106. Altuntepe, A., Öztürk, M.F., Kartal, E., Seyhan, A. and Zan, R. (2019). Grafen sentezi için alt-taş temizleme yaklaşımları. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 8,559-566.
107. Vlassiouk, I., Smirnov, S., Ivanov, I., Fulvio, P.F., Dai, S., Meyer, H., Chi, M., Hensley, D., Datskos, P. and Lavrik, N.V. (2011). Electrical and thermal conductivity of low temperature CVD graphene: the effect of disorder. *Nanotechnology*, 22 (27), 275716.
108. Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials science and engineering: R: Reports*, 37 (4-6), 129-281.
109. Choi, J.-H., Li, Z., Cui, P., Fan, X., Zhang, H., Zeng, C. and Zhang, Z. (2013). Drastic reduction in the growth temperature of graphene on copper via enhanced London dispersion force. *Scientific Reports*, 3 (1), 1925.
110. Wu, T., Ding, G., Shen, H., Wang, H., Sun, L., Zhu, Y., Jiang, D. and Xie, X. (2013). Continuous graphene films synthesized at low temperatures by introducing coronene as nucleation seeds. *Nanoscale*, 5 (12), 5456-5461.
111. Loginova, E., Bartelt, N.C., Feibelman, P.J. and McCarty, K.F. (2009). Factors influencing graphene growth on metal surfaces. *New Journal of Physics*, 11 (6), 063046.
112. Losurdo, M., Giangregorio, M.M., Capezzuto, P. and Bruno, G. (2011). Graphene CVD growth on copper and nickel: role of hydrogen in kinetics and structure. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13 (46), 20836-20843.
113. Chen, H., Zhu, W. and Zhang, Z. (2010). Contrasting behavior of carbon nucleation in the initial stages of graphene epitaxial growth on stepped metal surfaces. *Physical Review Letters*, 104 (18), 186101.
114. Malard, L., Pimenta, M.A., Dresselhaus, G. and Dresselhaus, M. (2009). Raman spectroscopy in graphene. *Physics Reports*, 473 (5-6), 51-87.
115. Boyd, R.W. (2020). *Nonlinear optics*. Academic press 0128110031.
116. Wu, J.-B., Lin, M.-L., Cong, X., Liu, H.-N. and Tan, P.-H. (2018). Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*, 47 (5), 1822-1873.
117. Gupta, A., Chen, G., Joshi, P., Tadigadapa, S. and Eklund (2006). Raman scattering from high-frequency phonons in supported n-graphene layer films. *Nano Letters*, 6 (12), 2667-2673.
118. Duhee, Y., Hyerim, M., Hyeonsik, C., JinSik, C., JungAe, C. and BaeHo, P. (2009). Variations in the raman spectrum as a function of the number of graphene layers. *Journal Korean Physical Society*, 55(3(2)), 1299-1303.
119. Bayram, O. (2019). A study on 3D graphene synthesized directly on Glass/FTO substrates: Its Raman mapping and optical properties. *Ceramics International*, 45 (14), 16829-16835.

120. Casiraghi, C., Hartschuh, A., Qian, H., Piscanec, S., Georgi, C., Fasoli, A., Novoselov, K.S., Basko, D.M. and Ferrari, A.C. (2011). Raman spectroscopy of graphene edges. *Nano Letters*, 9 (4), 1433-1441.
121. Wang, Y.Y., Ni, Z.H., Shen, Z.X., Wang, H.M. and Wu, Y.H. (2008). Interference enhancement of Raman signal of graphene. *Applied Physics Letters*, 92 (4), 043121.
122. Thomsen, C. and Reich, S. (2000). Double resonant Raman scattering in graphite. *Physical Review Letters*, 85 (24), 5214.
123. Graf, D., Molitor, F., Ensslin, K., Stampfer, C., Jungen, A., Hierold, C. and Wirtz, L. (2007). Spatially resolved raman spectroscopy of single- and few-layer graphene. *Nano Letters*, 7 (2), 238-242.
124. Bayram, O. and Simsek, O. (2019). Vertically oriented graphene nano-sheets grown by plasma enhanced chemical vapor deposition technique at low temperature. *Ceramics International*, 45 (11), 13664-13670.
125. Liu, L., Zhou, H., Cheng, R., Yu, W.J., Liu, Y., Chen, Y., Shaw, J., Zhong, X., Huang, Y. and Duan, X. (2012). High-yield chemical vapor deposition growth of high-quality large-area AB-stacked bilayer graphene. *ACS Nano*, 6 (9), 8241-8249.
126. Her, M., Beams, R. and Novotny, L. (2013). Graphene transfer with reduced residue. *Physics Letters A*, 377 (21), 1455-1458.
127. Goswami, A. (1996). *Thin film fundamentals*. New Delhi: New Age International, 1-3.
128. Pejova, B. and Grozdanov, I. (2006). Structural and optical properties of chemically deposited thin films of quantum-sized bismuth(III) sulfide. *Materials Chemistry and Physics*, 99 (1), 39-49.
129. Adachi, H., Wasa, Kiyotaka. (2012). Fundamentals of sputtering., Wasa, K., Kanno, I. and Kotera, H.,(Eds.). *Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS*. New York. Elsevier, 4-28.
130. Leskelä, M. and Ritala, M. (2002). Atomic layer deposition (ALD): from precursors to thin film structures. *Thin Solid Films*, 409 (1), 138-146.
131. Chen, S., Zhang, J., Feng, X., Wang, X., Luo, L., Shi, Y., Xue, Q., Wang, C., Zhu, J. and Zhu, Z. (2005). Nanocrystalline ZnO thin films on porous silicon/silicon substrates obtained by sol-gel technique. *Applied Surface Science*, 241 (3-4), 384-391.
132. Ng, S., Siong Tneh, S., Kwong Yam, F. and Hassan, Z. (2018). Optical properties and UV sensing response of nitrogen-doped TiO₂ thin film by CVD. *Journal of Physics: Conference Series*, 1083, 012025.

133. Al Asmar, R., Atanas, J.P., Ajaka, M., Zaatar, Y., Ferblantier, G., Sauvajol, J.L., Jabbour, J., Juillaget, S. and Foucaran, A. (2005). Characterization and Raman investigations on high-quality ZnO thin films fabricated by reactive electron beam evaporation technique. *Journal of Crystal Growth*, 279 (3), 394-402.
134. Boratto, M.H., Ramos, R.A., Congiu, M., Graeff, C.F.O. and Scalvi, L.V.A. (2017). Memristive behavior of the SnO₂/TiO₂ interface deposited by sol-gel. *Applied Surface Science*, 410, 278-281.
135. Chaabouni, F., Abaab, M. and Rezig, B. (2006). Characterization of n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering. *Superlattices and Microstructures*, 39 (1), 171-178.
136. Abou Chaaya, A., Viter, R., Bechelany, M., Alute, Z., Erts, D., Zaleskaya, A., Kovalevskis, K., Rouessac, V., Smyntyna, V. and Miele, P. (2013). Evolution of microstructure and related optical properties of ZnO grown by atomic layer deposition. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 4, 690-698.
137. Kaymak, N., Efil Kutluoğlu, E., Seven, E., Tataroğlu, A., Bilge Ocak, S. and Öz Orhan, E. (2020). Effects of temperature and frequency on capacitance and conductance characteristics of zinc-oxide based MIS-structure. *Physica B: Condensed Matter*, 576, 411721.
138. Leskelä, M. and Ritala, M. (2003). Atomic layer deposition chemistry: recent developments and future challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 42 (45), 5548-5554.
139. George, S.M. (2010). Atomic layer deposition: an overview. *Chemical Reviews*, 110 (1), 111-131.
140. Niinistö, J. and Niinistö, L. (2012). Basic Features and Historical Development of Atomic Layer Deposition. Pinna, N. and Knez, M. (Eds.), *Atomic layer deposition of nanostructured materials*. Weinheim, Germany. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA. XXII.
141. Miikkulainen, V., Leskelä, M., Ritala, M. and Puurunen, R.L. (2013). Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: Overview and general trends. *Journal of Applied Physics*, 113 (2), 2.
142. Ponraj, J.S., Attolini, G. and Bosi, M. (2013). Review on atomic layer deposition and applications of oxide thin films. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 38 (3), 203-233.
143. Ott, A.W., McCarley, K.C., Klaus, J.W., Way, J.D. and George, S.M. (1996). Atomic layer controlled deposition of Al₂O₃ films using binary reaction sequence chemistry. *Applied Surface Science*, 107, 128-136.
144. French, P., Krijnen, G. and Roozeboom, F. (2016). Precision in harsh environments. *Microsystems & Nanoengineering*, 2 (1), 1-12.

145. Oviroh, P.O., Akbarzadeh, R., Pan, D., Coetzee, R.A.M. and Jen, T.-C. (2019). New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 20 (1), 465-496.
146. Maslar, J.E., Hurst, W.S., Jr., D.R.B., Kimes, W.A., Nguyen, N.V. and Moore, E.F. (2007). In situ monitoring of hafnium oxide atomic layer deposition. *AIP Conference Proceedings*, 931 (1), 121-125.
147. Onn, T.M., Küngas, R., Fornasiero, P., Huang, K. and Gorte, R.J. (2018). Atomic layer deposition on porous materials: problems with conventional approaches to catalyst and fuel cell electrode preparation. *Inorganic Solid-State Chemistry*, 6 (1), 34.
148. Bae, C., Shin, H. and Nielsch, K. (2011). Surface modification and fabrication of 3D nanostructures by atomic layer deposition. *MRS Bulletin*, 36 (11), 887-897.
149. Ateş, H. and Polat Gönüllü, M. (2019). Atomik katman biriktirme tekniğine genel bakış: ZnO, TiO₂ Ve Al₂O₃ filmlerin üretimi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 7 (3), 649-660.
150. Zhang, X.-Y., Hsu, C.-H., Lien, S.-Y., Wu, W.-Y., Ou, S.-L., Chen, S.-Y., Huang, W., Zhu, W.-Z., Xiong, F.-B. and Zhang, S. (2019). Temperature-dependent HfO₂/Si interface structural evolution and its mechanism. *Nanoscale Research Letters*, 14 (1), 83.
151. Groner, M.D., Fabreguette, F.H., Elam, J.W. and George, S.M. (2004). Low-temperature Al₂O₃ atomic layer deposition. *Chemistry of Materials*, 16 (4), 639-645.
152. Choi, M.-J., Park, H.-H., Jeong, D.S., Kim, J.H., Kim, J.-S. and Kim, S.K. (2014). Atomic layer deposition of HfO₂ thin films using H₂O₂ as oxidant. *Applied Surface Science*, 301, 451-455.
153. Belyansky, M. (2012). The-film strain engineering and pattern effect in dielectrics CVD. Seshan, K. (Eds.), *Handbook of thin film deposition*. Oxford. Elsevier. 89-121.
154. Chang, H.J. and Park, H.-H. (2008). Characteristics of zinc-oxide-sul de-mixed films deposited by using atomic layer deposition. *Journal of the Korean Physical Society*, 53 (6), 3287-3295.
155. Yang, R.B., Bachmann, J., Reiche, M., Gerlach, J.W., Gösele, U. and Nielsch, K. (2009). Atomic layer deposition of antimony oxide and antimony sulfide. *Chemistry of Materials*, 21 (13), 2586-2588.
156. Shi, F. (2018). *In Magnetron Sputtering*. London: Intech Open, 1-3.
157. Abegunde, O.O., Akinlabi, E.T., Oladijo, O.P., Akinlabi, S. and Ude, A.U. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science*, 6(2), 174-199.

158. Abdullah, A. and Mohammed, A. (2018). *Scanning electron microscopy (SEM): a review*. in *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics*. Hervex, Baile Govora, Romania, 77-85.
159. Fultz, B. and Howe, J.M. (2002). *Transmission electron microscopy and diffractometry of materials*. Springer, Berlin, Heidelberg.
160. Francis, L.W., Lewis, P.D., Wright, C.J. and Conlan, R.S. (2009). Atomic force microscopy comes of age. *Biol Cell*, 102 (2), 133-43.
161. Seo, Y. and Jhe, W. (2007). Atomic force microscopy and spectroscopy. *Reports on Progress in Physics*, 71 (1), 016101.
162. Francis, L.W., Lewis, P.D., Wright, C.J. and Conlan, R.S. (2010). Atomic force microscopy comes of age. *Biology of the Cell*, 102 (2), 133-143.
163. Kilburn, M.R. and Wacey, D. (2015). Nanoscale secondary ion mass spectrometry (nanoSIMS) as an analytical tool in the geosciences. Grice, K. (Eds.), *Principles and practice of analytical techniques in geosciences*. Cambridge. The Royal Society of Chemistry. 1-34.
164. Oehler, D.Z. and Cady, S.L. (2014). Biogenicity and syngeneity of organic matter in ancient sedimentary rocks: recent advances in the search for evidence of past life. *Challenges*, 5 (2), 260-283.
165. Saha, B. and Chakraborty, P. (2013). MCsⁿ⁺-SIMS: An innovative approach for direct compositional analysis of materials without standards. *Energy Procedia*, 41, 80-109.
166. Ronsheim, P.A. (2006). Depth profiling of emerging materials for semiconductor devices. *Applied Surface Science*, 252 (19), 7201-7204.
167. Tsao, J.Y., Chowdhury, S., Hollis, M.A., Jena, D., Johnson, N.M., Jones, K.A., ... Simmons, J.A. (2018). Ultrawide-bandgap semiconductors: research opportunities and challenges. *Advanced Electronic Materials*, 4 (1), 1600501.
168. Zhang, J., Qin, Z., Zeng, D. and Xie, C. (2017). Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19 (9), 6313-6329.
169. Higashiwaki, M., Sasaki, K., Murakami, H., Kumagai, Y., Koukitu, A., Kuramata, A., Masui, T. and Yamakoshi, S. (2016). Recent progress in Ga₂O₃ power devices. *Semiconductor Science and Technology*, 31 (3), 034001.
170. Sze, S.M., Li, Y. and Ng, K.K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc. 1119618002.
171. Tyagi, M.S. (1984). Physics of Schottky barrier junction. Sharma, B. (Eds.), *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. Boston. Springer. 1-11.

172. Wilson, A.H. and Fowler, R.H. (1931). The theory of electronic semi-conductors. - II. *Royal Society -A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 134 (823), 277-287.
173. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26 (52), 843-843.
174. Mott, N.F. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34 (4), 568-572.
175. Tan, S.O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Journal of Polytechnic*, 21 (4), 977-989.
176. Saha, B., Sarkar, K., Bera, A., Deb, K. and Thapa, R. (2017). Schottky diode behaviour with excellent photoresponse in NiO/FTO heterostructure. *Applied Surface Science*, 418, 328-334.
177. Digdaya, I.A., Adhyaksa, G.W.P., Trześniewski, B.J., Garnett, E.C. and Smith, W.A. (2017). Interfacial engineering of metal-insulator-semiconductor junctions for efficient and stable photoelectrochemical water oxidation. *Nature Communications*, 8 (1), 15968.
178. Durmuş, P. (2018). Metal/ferro-elektrik/yarıiletken (Au/Bi₄Ti₃O₁₂/n-Si) (MFS) yapıların hazırlanması ve kompleks dielektrik ile elektrik modülüsün 1 MHz için sıcaklığa bağlı incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (2), 336-344.
179. Kaymak, N., Öz Orhan, E., Bilge Ocak, S. and Birkan Selçuk, A. (2018). Investigation of low-frequency dependent characteristics of Al/Maleic Anhydride (MA)/p-Si Schottky barrier diode. *AIP Conference Proceedings*, 1935 (1), 160003.
180. Nicollian, E.H. and Brews, J.R. (2003). *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 9-170.
181. Lim, T. and Ju, S. (2019). Control of adiabatic properties using thermal meta-structures. *AIP Advances*, 9 (4), 045111.
182. Wilmsen, C.W. (1985). Oxide/III-V compound semiconductor interfaces. Wilmsen, C.W. (Eds.), *Physics and chemistry of III-V compound semiconductor interfaces*. New York and London. Springer. 403-462.
183. Prakash, A., Maikap, S., Banerjee, W., Jana, D. and Lai, C.-S. (2013). Impact of electrically formed interfacial layer and improved memory characteristics of IrOx/high-κx/W structures containing AlOx, GdOx, HfOx, and TaOx switching materials. *Nanoscale Research Letters*, 8 (1), 379.
184. Rajagopal Reddy, V. and Venkata Prasad, C. (2018). Surface chemical states, electrical and carrier transport properties of Au/ZrO₂/n-GaN MIS junction with a high-k ZrO₂ as an insulating layer. *Materials Science and Engineering: B*, 231, 74-80.

185. Al-Ahmadi, N.A. (2020). Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*, 7 (3), 032001.
186. Taşcıoğlu, İ., Uslu, H., Altındal, Ş., Durmuş, P., Dökme, İ. and Tunç, T. (2010). The effect of gamma irradiation on electrical characteristics of Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Polymer Science*, 118 (1), 596-603.
187. An, Y., Behnam, A., Pop, E. and Ural, A. (2013). Metal-semiconductor-metal photodetectors based on graphene/p-type silicon Schottky junctions. *Applied Physics Letters*, 102 (1), 013110.
188. Selvi, H., Unsuree, N., Whittaker, E., Halsall, M.P., Hill, E.W., Thomas, A., Parkinson, P. and Echtermeyer, T.J. (2018). Towards substrate engineering of graphene–silicon Schottky diode photodetectors. *Nanoscale*, 10 (7), 3399-3409.
189. Tataroglu, A., Altındal, Ş. and Bülbül, M. (2005). Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure. *Microelectronic Engineering*, 81 (1), 140-149.
190. Kar, S. and Dahlke, W.E. (1972). Interface states in MOS structures with 20–40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si. *Solid-State Electronics*, 15 (2), 221-237.
191. Kaymak, N., Orhan, E.O., Ocak, S.B. and Selçuk, B. (2018). An investigation of the electrical properties of PbO based MOS-type different Schottky barrier diodes on a structure. *AIP Conference Proceedings*, 1935 (1), 160002.
192. Pulfrey, D.L. (1978). MIS solar cells: A review. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 25 (11), 1308-1317.
193. Fonash, S.J. (1976). Outline and comparison of the possible effects present in a metal–thin–film–insulator–semiconductor. *Journal of Applied Physics*, 47 (8), 3597-3602.
194. Karabulut, A., Orak, İ. and Türüt, A. (2018). Electrical characteristics of Au/Ti/HfO₂/n-GaAs metal-insulator-semiconductor structures with high-k interfacial layer. *International Journal of Chemistry and Technology*, (2), 116-122.
195. Altındal, Ş., Safak, Y., Kaya, A. and Sönmez, Z. (2012). Investigation of interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) structures with 50 and 826 Å SiO₂ interfacial layer using admittance spectroscopy method. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 14, 998-104.
196. Mangal, S., Adhikari, S. and Banerji, P. (2009). Aluminum/polyaniline/GaAs metal-insulator-semiconductor solar cell: Effect of tunneling on device performance. *Applied Physics Letters*, 94 (22), 223509.
197. Arslan, E., Badali, Y., Aalizadeh, M., Altındal, Ş. and Özbay, E. (2021). Current transport properties of (Au/Ni)/HfAlO₃/n-Si metal–insulator–semiconductor junction. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 148, 109758.

198. Zhu, T. and Chong, M.N. (2015). Prospects of metal–insulator–semiconductor (MIS) nanojunction structures for enhanced hydrogen evolution in photoelectrochemical cells: a review. *Nano Energy*, 12, 347-373.
199. Pfann, W. and Garrett, C. (1991). Semiconductor varactors using surface space-charge layers. Sze, S.M. (Eds.), *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*. World Scientific. 547-548.
200. Frankl, D.R. (1961). Some effects of material parameters on the design of surface space-charge varactors. *Solid-State Electronics*, 2 (1), 71-76.
201. Ligenza, J.R. and Spitzer, W.G. (1960). The mechanisms for silicon oxidation in steam and oxygen. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 14, 131-136.
202. Jayavel, P., Udhayasankar, M., Kumar, J., Asokan, K. and Kanjilal, D. (1999). Electrical characterisation of high energy 12C irradiated Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 156 (1), 110-115.
203. Güllü, Ö., Çankaya, M., Biber, M. and Türüt, A. (2008). Gamma irradiation-induced changes at the electrical characteristics of organic-based schottky structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (13), 135103.
204. Badila, M., Godignon, P., Millan, J., Berberich, S. and Brezeanu, G. (2001). The electron irradiation effects on silicon gate dioxide used for power MOS devices. *Microelectronics Reliability*, 41 (7), 1015-1018.
205. Srour, J.R., Marshall, C.J. and Marshall, P.W. (2003). Review of displacement damage effects in silicon devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50 (3), 653-670.
206. Hughes, H.L. and Benedetto, J.M. (2003). Radiation effects and hardening of MOS technology: devices and circuits. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50 (3), 500-521.
207. Dharmarasu, N., Arulkumaran, S., Sumathi, R.R., Jayavel, P., Kumar, J., Magudapathy, P. and Nair, K.G.M. (1998). Low energy proton irradiation induced interface defects on Pd/n-GaAs Schottky diodes and its characteristics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 140 (1), 119-123.
208. Akay, D., Efil, E., Kaymak, N., Öz Orhan, E. and Bilge Ocak, S. (2018). Study of frequency dependent characterization: applied gamma-ray irradiation on metal-polymer nanostructure. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 318 (2), 1409-1417.
209. Akay, D., Karadeniz, S., Selçuk, A.B. and Bilge Ocak, S. (2018). Effect of gamma-ray irradiation on the electrical characteristics of Al/C24H12/p-Si nano-structure. *Physica Scripta*, 93 (9), 095301.

210. Schwank, J.R., Shaneyfelt, M.R., Fleetwood, D.M., Felix, J.A., Dodd, P.E., Paillet, P. and Ferlet-Cavrois, V. (2008). Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55 (4), 1833-1853.
211. Sze, S.M., Li, Y. and Ng, K.K. (2021). *Physics of semiconductor devices*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc.
212. Card, H. and Rhoderick, E. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4 (10), 1589.
213. Cheung, S. and Cheung, N. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current- voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49 (2), 85-87.
214. Bohlin, K. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60 (3), 1223-1224.
215. Norde, H. (1979). A modified forward I V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
216. Sands, D., Brunson, K.M. and Tayarani-Najaran, M.H. (1992). Measured intrinsic defect density throughout the entire band gap at the <100> Si/SiO₂ interface. *Semiconductor Science and Technology*, 7 (8), 1091-1096.
217. Reddy, V.R., Janardhanam, V., Won, J. and Choi, C.-J. (2017). Microstructural, electrical and frequency-dependent properties of Au/p-Cu₂ZnSnS₄/n-GaN heterojunction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 499, 180-188.
218. Lee, C.H., Ryu, S.H. and Oh, S.Y. (2003). Characteristics of a single- layered organic electroluminescent device using a carrier- transporting copolymer and a nonconjugated light- emitting polymer. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 41 (21), 2733-2743.
219. Yang, L., Yu, X., Hu, W., Wu, X., Zhao, Y. and Yang, D. (2015). An 8.68% efficiency chemically-doped-free graphene–silicon solar cell using silver nanowires network buried contacts. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7 (7), 4135-4141.
220. Zhong, M., Xu, D., Yu, X., Huang, K., Liu, X., Qu, Y., Xu, Y. and Yang, D. (2016). Interface coupling in graphene/fluorographene heterostructure for high-performance graphene/silicon solar cells. *Nano Energy*, 28, 12-18.
221. Altındal, Ş., Yücedağ, İ. and Tataroğlu, A. (2009). Analysis of surface states and series resistance in Au/n-Si Schottky diodes with insulator layer using current–voltage and admittance–voltage characteristics. *Vacuum*, 84 (3), 363-368.
222. Kaschieva, S. and Alexandrova, S. (2002). Effect of low dose γ -radiation on the annealing temperature of radiation defects in ion implanted MOS structures. *Materials Science and Engineering: B*, 95 (3), 295-298.
223. Kumar, A. and Lee, C.H. (2013). Synthesis and biomedical applications of graphene: present and future trends. *Advances in Graphene Science*, 5772-5578.



GAZİ GELECEKTİR..