

**GRAFİT SOYMA VE EPİTAKSİYEL YÖNTEMLERLE ELDE
EDİLMİŞ GRAFENLERDE MANYETOİLETİM VE YÜZEY
ÖZELLİKLERİ İNCELEMELERİ**

Kenan ELİBOL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2012

ANKARA

Kenan ELİBOL tarafından hazırlanan “GRAFİT SOYMA VE EPİTAKSİYEL YÖNTEMLERLE ELDE EDİLMİŞ GRAFENLERDE MANYETOİLETİM VE YÜZEY ÖZELLİKLERİ İNCELEMELERİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet KASAP
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Abdullah YILDIZ
Enerji Sistemleri Müh., Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

.....

Tarih: 13 / 12 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kenan ELİBOL

**GRAFİT SOYMA VE EPİTAKSİYEL YÖNTEMLERLE ELDE EDİLMİŞ
GRAFENLERDE MANYETOİLETİM VE YÜZEY ÖZELLİKLERİ
İNCELEMELERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Kenan ELİBOL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiş grafen numunelerinin yüzey özellikleri ve manyetoiletim özellikleri incelendi. Grafen numunelerinin yüzey özellikleri, optik mikroskop, AFM ve SEM kullanılarak incelendi. Epitaksiyel grafen numunelerinin tabaka sayısını belirlemek için Raman spektrumu ölçüldü. Hall etkisi ve I-V ölçümleri için optik ve elektron-demeti litografi yöntemleri kullanılarak grafen aygıtlar üretildi. Grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiş grafen numunelerinin I-V karakteristikleri ölçüldü. Işığın, grafenin manyetoiletim özellikleri üzerine etkisini incelemek için, sabit manyetik alan altında, karanlık ve daha sonra aydınlık koşullarda, 25–300 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Helyum gazının ve suyun epitaksiyel grafenin Hall ölçümleri üzerine etkilerini incelemek için sabit manyetik alan altında, 30–300 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Grafenle helyum gazının etkileşmesini daha iyi anlamak için DFT hesaplamaları yapıldı.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : Grafen, Litografi, Raman, AFM, SEM, Hall etkisi

Sayfa Adedi : 95

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

**INVESTIGATION OF MAGNETOCONDUCTIVITY AND SURFACE
PROPERTIES OF EXFOLIATED AND EPITAXIALLY GROWN
GRAPHENE SAMPLES**

(M. Sc. Thesis)

Kenan ELIBOL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

December 2012

ABSTRACT

In this study, the properties of the surface and magnetoconductivity of exfoliated and epitaxially grown graphene samples were investigated. The properties of the surface of graphene samples were investigated by using optical microscope, AFM, and SEM. The Raman spectrum was measured to determine the number of layers which the epitaxial graphene samples have. The graphene devices were fabricated by using optical and e-beam lithography methods for Hall effect and I-V measurements. I-V characteristics of the exfoliated and epitaxially grown graphene samples were measured. To investigate the effect of light on the properties of magnetoconductivity of graphene, under of a fixed magnetic field, Hall effect measurements were carried out under dark and then illumination conditions at the 25-300 K temperature range. To investigate the effects of helium gas and water on Hall measurements of epitaxial graphene, under of a fixed magnetic field, Hall effect measurements were carried out at the 30-300 K temperature range. To better understand the interaction of helium with graphene, DFT calculations were performed.

Science Code : 202.1.147

Key Words : Graphene, Lithography, Raman, AFM, SEM, Hall effect

Page Number : 95

Adviser : Assoc. Prof. Dr. Sefer Bora LİSESİVDİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan, gerekli bilimsel altyapının oluşmasında fikir ve deneyimleriyle yol gösteren, hakkını ödeyemeyeceğim değerli danışman hocam Doç. Dr. Sefer Bora Lişesivdin'e, çalışmalarım sırasında fikirlerini paylaşan ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Kasap'a, verdikleri moral ve motivasyon ile desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Yard. Doç. Dr. Pınar Taşlı, Öğr. Gör. Dr. Beyza Lişesivdin ve Dr. Gonca Özbay'a, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerekli tüm imkânları sunan değerli hocam Prof. Dr. Süleyman Özçelik'e ve çalışmalarımda kullandığım numunelerin temin edildiği ve karakterizasyonunun yapıldığı Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinin tüm imkânlarını sunan sayın Prof. Dr. Ekmel Özbay'a teşekkür ederim.

Numune hazırlama, ölçme ve karakterizasyon aşamasında bana yardımcı olan Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde çalışan hocalarıma, araştırmacı ve mühendis arkadaşlarıma, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde çalışan ve çalışmalarım sırasında destek sağlayan hocalarıma ve araştırmacı arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tezi, çalışmalarım sırasında maddi ve manevi olarak bana her zaman destek olan annem Meral Elibol, babam Rıza Elibol, kardeşlerim Kamuran Elibol ve Handesu Elibol'a ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. GRAFENİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Tarihi... ..	3
2.2. Atomik Yapısı	4
2.3. Özellikleri.....	7
2.3.1. Elektronik özellikleri.....	7
2.3.2. Mekanik özellikleri	8
2.3.3. Optik özellikleri	9
2.4. Sentezi	10
2.4.1. Grafit soyma.....	10
2.4.2. Epitaksiyel büyütme.....	14
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	16
3.1. Numune Hazırlama	16
3.2. Optik Litografi	17

Sayfa

3.3. Elektron Demeti Litografi	20
3.4. Raman Spektroskopisi	24
3.5. Grafenin Yüzey Karakterizasyonu	25
3.5.1. Optik mikroskop	25
3.5.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	27
3.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	30
3.6. Grafenin Elektriksel Karakterizasyonu	32
3.6.1. Hall etkisi ölçüm sistemi	32
3.6.2. Özdirenç ölçümleri	33
3.6.3. Hall etkisi ölçümleri	34
3.6.4. Manyetoiletim	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	38
4.1. Optik Mikroskop ile Grafen Tabakalarının Belirlenmesi	38
4.2. SiO ₂ /Si Alttaş Yüzeyinin Temizlenmesi	44
4.3. SEM Ölçümleri	46
4.4. AFM Ölçümleri	50
4.4.1. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenler için AFM sonuçları	51
4.4.2. Epitaksiyel yöntem ile elde edilen grafenler için AFM sonuçları	55
4.5. Raman Ölçümleri	58
4.6. I-V Ölçümleri	61
4.6.1. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenler için I-V ölçümleri	62
4.6.2. Epitaksiyel yöntemle elde edilen grafenler için I-V ölçümleri	63

	Sayfa
4.7. Işığın Taşıyıcı Yoğunluğu ve Hareketliliğine Etkisi	65
4.8. Helyum Gazı ve Suyun Ölçümlere Etkisi	70
4.8.1. Helyum gazının etkisi	70
4.8.2. Suyun etkisi	78
5. SONUÇLAR	81
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	92

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı yarıiletken malzemeler ve grafenin termal iletkenliği ve Young modülü	9

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yıllara göre grafen üzerine çıkan yayın sayısı [12]	4
Şekil 2.2. Tek tabaka grafenin balpeteği örgü yapısı ile $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ ile gösterilen temel örgü vektörleri. Ters örgü Brillouin bölgesi K ve K' ile gösterilmiş Dirac noktalarıyla bir altıgendir [24]	5
Şekil 2.3. Grafenin (a) Zigzag ve (b) Armchair geometrisi [25]	6
Şekil 2.4. Solda; bir grafen düzlüğün band yapısı. İletim ve valans bandı bir huni biçimindedir. Sağda; band yapısının üstten görünüşü.....	7
Şekil 2.5. Grafit soyma yöntemi.....	11
Şekil 2.6. (a) DC gerilim işlemi ve (b) ısıtma işlemi	13
Şekil 2.7. SiO ₂ yüzey koordinatları. Sağda büyütülmüş bir görüntüsü gösterilmiştir.....	13
Şekil 2.8. Si ve C ile sonlandırılmış silisyum karbürün yandan görünüşü [46]	15
Şekil 3.1. Üstte, epitaksiyel grafen numuneleri için tasarlanmış numune tutucunun fotoğrafı ve şematik gösterimi. Altta, van der Pauw geometrisindeki epitaksiyel grafen numunesin optik mikroskop görüntüleri, sağdaki 20X büyütülmüş durumu.....	16
Şekil 3.2. Pozitif ve negatif optik litografi işleminin şematik gösterimi. (c) ve (e) pozitif rezist varken uygulanan optik litografi işlemini temsil etmektedir. (d) ve (e) ise negatif rezist varken uygulanan optik litografi işlemini temsil etmektedir	18
Şekil 3.3. Grafit soyma yöntemiyle elde edilmiş grafenlerin elektrod fabrikasyonları için litografi şeması. (a) Temiz bir SiO ₂ /Si alttaşı üzerinde duran bir grafen, önceikle (b) PMMA rezisti ile kaplanmıştır. (c) Daha sonra elektron demetine maruz bırakılmış rezist, (d) bir çözücü ile çözünmüştür. (e) Çözücü uygulandıktan sonra numune üzerine ince bir metal film çöktürülmüştür. (f) Son olarak rezist üzerindeki ince metal film liftoff ile kaldırılmıştır	22
Şekil 3.4. Epitaksiyel grafen numuneleri için van der Pauw geometrisinde tasarlanmış bir çizim	23

Sayfa

Şekil 3.5.	(a) Van der Pauw geometrisinde, kontakları alınmış epitaksiyel grafen numunesinin optik mikroskop görüntüsü ve (b) bunun için tasarlanmış çizim	24
Şekil 3.6.	SiO ₂ yüzeyi üzerinde (a) 200 ve (b) 1000 kat büyütülmüş grafen numunesinin optik mikroskop görüntüsü (grafen tabakasının bulunduğu bölge (a)'da beyaz çember ile gösterilmiştir)	26
Şekil 3.7.	Atomik kuvvet mikroskobunun şematik diyagramı	27
Şekil 3.8.	Bir atomik kuvvet mikroskobu iğnesi	29
Şekil 3.9.	AFM işlem modları iğne ve numune arasındaki etkileşme kuvvetini gösteren bu diyagramda siyah noktalarla gösterilmiştir. Tapping ve rezonans modlarda konsol titreşimleri rezonans frekansına yakın, fakat kontak modda sanki (quasi)-statiktir	29
Şekil 3.10.	Bir CRT (katot ışınları tüpü) ekran ile bir taramalı elektron mikroskobunun şematik görüntüsü	31
Şekil 3.11.	Çeşitli van der Pauw geometrileri. (a) Yonca yaprağı biçiminde Van der Pauw yapısı (tercih edilir). (b) Kare Van der Pauw yapısı (tercih edilir). (c) Kontakları kenarların dışında olan kare Van der Pauw yapıları (tercih edilmiyor)	33
Şekil 3.12.	(a) Klasik Hall etkisinin şematik gösterimi. (b) Numune içindeki bir elektronun uygulanan dış manyetik alan ve elektrik alanla hareketinin yönelimi. (c) Numune içindeki bir elektronun uygulanan dış manyetik alan ve elektrik alanla hareketinin yönelimi	35
Şekil 4.1.	$3,3 \times 10^7$ V/m elektrik alan altında SiO ₂ /Si alttaşı üzerinde oluşan grafitik yapılar	39
Şekil 4.2.	$6,7 \times 10^7$ V/m elektrik alan altında SiO ₂ /Si alttaşı üzerinde oluşan grafitik yapılar	40
Şekil 4.3.	10×10^7 V/m elektrik alan altında SiO ₂ /Si alttaşı üzerinde oluşan grafitik yapılar	41
Şekil 4.4.	SiO ₂ /Si alttaşı 200 °C'de 5 saniye ısıtıldı	42
Şekil 4.5.	SiO ₂ /Si alttaşı 200 °C'de 10 saniye ısıtıldı	43
Şekil 4.6.	SiO ₂ /Si alttaşı 200 °C'de 20 saniye ısıtıldı	44

Sayfa

Şekil 4.7. BG024 numunesinin temizlenmeden önceki ve temizlendikten sonraki optik mikroskop görüntüleri.....	45
Şekil 4.8. BG025 numunesinin temizlenmeden önceki ve temizlendikten sonraki optik mikroskop görüntüleri.....	46
Şekil 4.9. BG026-R2K1 ve BG021-R3L8 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.....	47
Şekil 4.10. BG026-R1G1 ve BG021-R4L15 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.....	48
Şekil 4.11. BG040-R3M3 ve BG021-R3H1 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.....	49
Şekil 4.12. SiO ₂ /Si alttaşın SEM görüntüsü	50
Şekil 4.13. BG026-R2K1 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.....	51
Şekil 4.14. BG034-R4L15 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.....	53
Şekil 4.15. BG046-R2C10 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.....	54
Şekil 4.16. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (85 µm genişlikte), altta; yüzey yükselteleri	55
Şekil 4.17. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (30 µm genişlikte), altta; yüzey yükselteleri	56
Şekil 4.18. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (5 µm genişlikte), altta; yüzey yükselteleri	57
Şekil 4.19. 932 kodlu numunenin Raman ölçüm verileri.....	58
Şekil 4.20. 934 kodlu numunenin Raman ölçüm verileri.....	60
Şekil 4.21. Metal pedleri ile BG030_R4N12 numunesinin SEM görüntüsü	62
Şekil 4.22. BG030_R4N12 ve BG029_R1L0 numunesinin akım-voltaj ölçümü	63
Şekil 4.23. 932 kodlu numunenin akım-voltaj ölçümü	64

Sayfa

Şekil 4.24. 934 kodlu numunenin akım-voltaj ölçümü	65
Şekil 4.25. 932 kodlu numunenin karanlık ve ışıklı ortamda Hall ölçümü sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (c) Sıcaklık ile öz direncinin değişimi	67
Şekil 4.26. 934 kodlu numunenin karanlık ve ışıklı ortamda Hall ölçümü sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (c) Sıcaklık ile öz direncinin değişimi	69
Şekil 4.27. SiC alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüş birkaç tabakalı grafenin tabakaları arasına sızan helyum (He) atomlarının temsili gösterimi.....	70
Şekil 4.28. 932 kodlu numunenin farklı zamanlarda alınan 4 ölçüm sonucu. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği.....	71
Şekil 4.29. 934 kodlu numunenin farklı zamanlarda alınan 4 ölçüm sonucu. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği.....	72
Şekil 4.30. ATK hesaplarında kullanılan yapılar. (a) İki grafen düzlük arası boşken, (b) helyum atomu altıgenin içindeyken, (c) helyum atomu iki atomun ortasında yken ve (d) helyum atomu alt grafen düzlükteki karbon atomunun üzerindeyken	73
Şekil 4.31. Simülasyon başlamadan önce [(a) ve (c)] ve bittikten sonra [(b), (d)] iki grafen düzlüğün durumlarındaki değişim. B: İki grafen düzlük arası boşken, İ: Helyum atomu altıgenin içindeyken.....	74
Şekil 4.32. Simülasyon başlamadan önce [(a) ve (c)] ve bittikten sonra [(b), (d)] iki grafen düzlüğün durumlarındaki değişim. O: Helyum atomu iki atomun ortasında yken, Ü: helyum atomu alt grafen düzlükteki karbon atomunun üzerindeyken	75
Şekil 4.33. Üstte B durumu, altta ise İ durumu için band yapısı ve DOS grafikleri	76
Şekil 4.34. Üstte O durumu, altta ise Ü durumu için band yapısı ve DOS grafikleri	77
Şekil 4.35. 934 kodlu numunenin 345-30 K arasındaki ve su (H ₂ O) ile katkılandıktan sonraki Hall ölçüm sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (c) Sıcaklık ile öz direncinin değişimi	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Grafit soyma yöntemi için gerekli olan temel malzemeler: (a) HOPG, (b) bant ve (c) SiO ₂ /Si alttaşlar	12
Resim 3.2. Karl Suss MA6 model optik litografi sistemi.....	19
Resim 3.3. Raith e_LiNE nanolitografi sistemi.....	21
Resim 3.4. Leica DM6000 M optik mikroskobu.....	26
Resim 3.5. Veeco di CP-II multi mode AFM sistemi	28
Resim 3.6. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi	32
Resim 4.1. Agilet B1505A Semiconductor Device Analyzer ve M150 sonda istasyonundan oluşan darbeleri yarıiletken analiz sistemi	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	C-C arası bağ uzunluğu
a_0	Örgü sabiti
$\vec{a}_1, \vec{a}_2$	Örgü vektörleri
α	İnce yapı sabiti
$\vec{b}_1, \vec{b}_2$	Ters örgü vektörleri
$\vec{B}$	Manyetik alan
c	Işık hızı
d	Numunenin kalınlığı
d	Grafen tabakaları arasındaki mesafe
e	Elektronun yükü
$\vec{E}$	Elektrik alan
E_F	Fermi seviyesi
$E(k)$	Enerji dispersiyon bağıntısı
E_y	Hall elektrik alanı
$f(R_{12,34}/R_{23,41})$	Düzeltilme faktörü
g_m	Geçişiletkenliği
$\hbar$	Planck sabiti
I	Numuneden geçen taşıyıcı akımı
$\vec{J}$	Akım yoğunluğu
k	Dalgavektörü
k_I	Uygulanan işlem için verilen bir k-faktörü
K, K'	Dirac noktaları
L	Gerilim uçları arasındaki mesafe
λ	Işığın dalga boyu

Simgeler**Açıklama**

m^*	Yük taşıyıcısı etkin kütlesi
μ_H	Hall hareketliliği
n	Elektron yük yoğunluğu
NA	Sistemin nümerik açıklığı
n_H	Hall taşıyıcı yoğunluğu
$\vec{\rho}(B)$	Magneto-özdirenç tensörü
ρ_{ij}	Özdirenç tensörü (ij indisli)
r	Çözünürlük
R_H	Hall katsayısı
R_{xx}	Boyuna direnç
R_{xy}	Enine direnç (Hall direnci)
$\vec{\sigma}(B)$	Magneto-iletkenlik tensörü
σ_{ij}	İletkenlik tensörü (ij indisli)
τ	İki saçılma arasındaki ortalama zaman
$\vec{v}$	Taşıyıcıların hızı
v_F	Fermi hızı
V_y	Hall voltajı
W	Numunenin genişliği
w_c	Siklotron frekansı

Kısaltmalar**Açıklama**

0-B	Sıfır boyutlu
1-B	Bir boyutlu
2-B	İki boyutlu
3-B	Üç boyutlu
2DEG	2 boyutlu elektron gazı
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
C	Karbon

Kısaltmalar	Açıklama
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
CRT	Katot ışınları tüpü
DFT	Yoğunluk fonksiyon teorisi
DOS	Durum yoğunluğu
EBL	Elektron demeti litografi
FWHM	Yarı Yükseklik Tam Genişliği
GFET	Grafen alan etkili transistör
HOPG	Sonderece iyi yönelmiş grafit
IPA	İzo-propanol
IR	Kızıl ötesi
I-V	Akım-voltaj
LED	Işık yayan diyot
MIBK	Metil-izobütil keton
ML	Tek tabaka
PMMA	Poli metil metakrilattan
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiC	Silikon karbür
STCF	Bilim ve Teknoloji Hizmetleri Konseyi
UHV	Ultra yüksek vakum
UV	Morötesi

1. GİRİŞ

Saf karbonun allotroplarından (karbon nanotüp, fulleren, grafit, elmas) biri olan grafen, 0,142 nm uzunluğunda C-C bağları ile iki boyutlu bir bal peteği örgüsü şeklinde dizilmiş karbon atomlarının tek tabakalı bir düzlemidir [1]. Grafenin içinde bulunan elektronlar $v_F \sim 10^6$ m.s⁻¹ hızı ile kütesiz rölativistik parçacıklar gibi davranırlar [2]. Bu nedenle grafende, anormal kuantum Hall etkisi ve lokalizasyonun olmaması gibi çok tuhaf özellikler gözlenir. Grafenin oda sıcaklığında 250,000 cm²/V.s. civarındaki yüksek elektron hareketliliği, 5000 Wm⁻¹K⁻¹ civarında olağanüstü termal iletkenliği ve 1 TPa değerindeki Young modülü ile üstün mekanik özellikleri, onun ilgi çekici özelliklerinin bir kaçını göstermektedir [3].

Grafenin bazı potansiyel uygulamaları şunlardır: Alan etkisi aygıtları, sensörler, güneş hücreleri, tek molekül gaz algılama, şeffaf iletken elektrotlar, polimer kompozitler, nanokompozitler, süperkapasitörler ve enerji depolama aygıtları [4,5]. Grafenin boyutu 1-2 nm gelişliğinde dar şeritler biçiminde küçültülerek belirgin bir band aralığı oluşturulabilir ve potansiyel transistör uygulamaları için yarıiletken grafenler de üretilebilir [5-7]. Ayrıca, grafenin elektriksel, mekanik, termal ve optik birçok olağandışı özelliği, malzeme araştırmacıları arasında çok büyük ilgi yaratmıştır. Bu nedenle, gelecek elektronik ve kompozit endüstrisi için yeni bir malzeme arayan bilim insanları, grafeni ufukta parlayan bir yıldız olarak görmektedirler. Grafen, özellikle düşük maliyeti ve üretimindeki kolaylıklar nedeniyle dikkat çekmiştir [8]. Fakat geniş yüzeyli ve tek tabakalı bir grafen elde etmek halen çok kolay değildir. Transistör uygulamaları için kullanılacak olan malzemenin bir band aralığına sahip olması gerekir fakat tek tabaka bir grafende band aralığı bulunmamaktadır [9, 10]. Ancak, SiC alttaşı üzerine büyütülmüş epitaksiyel grafen üzerinde açılı-çözümlemeli fotoemisyon spektroskopisi ile SiC alttaşı ile grafenin etkileşimi sonucu 0,26 eV band aralığı olduğu gözlenmiştir [11].

Bu tez çalışmasında kullanılan grafen numuneleri, grafit soyma yöntemi ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu yöntemlerle elde edilen grafen tabakaları üzerine aygıt fabrikasyonu yapıldı ve grafen tabakalarının yüzey özellikleri ve

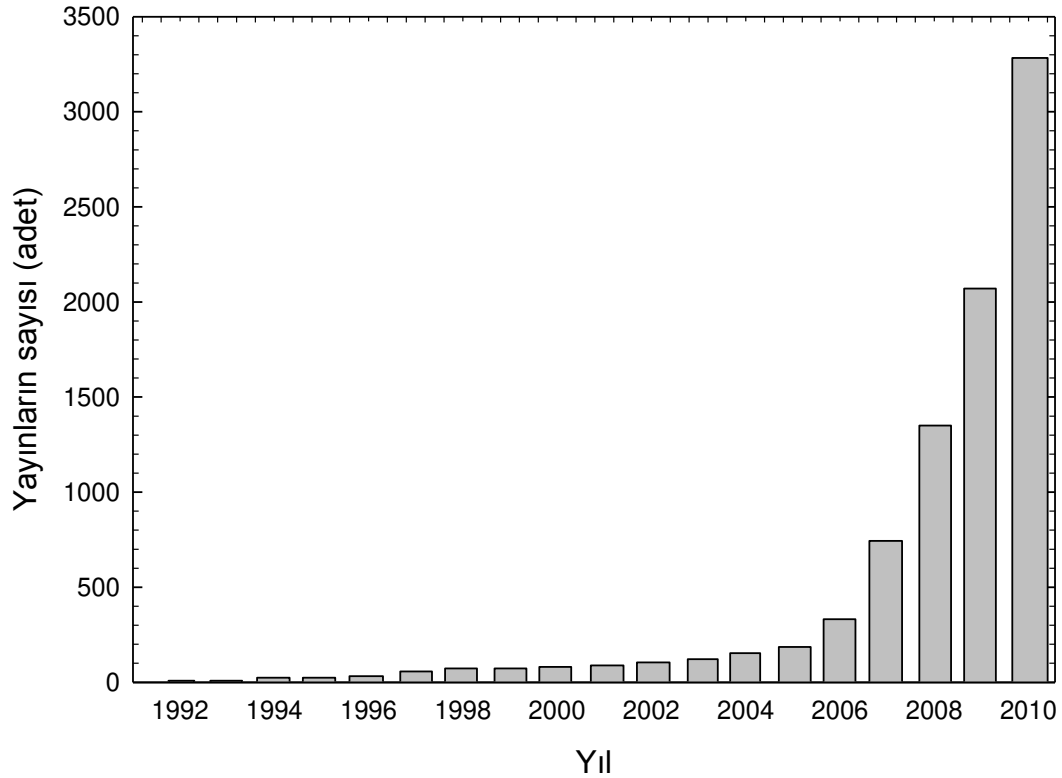
manyetoiletim özellikleri incelendi. Numunelerin yüzey karakterizasyonu ve grafen aygıt fabrikasyonu Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) Laboratuvarında yapılırken, elektriksel karakterizasyonu Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki Hall Etkisi/DLTS Laboratuvarında yapılmıştır. Grafenin yüzey incelemeleri için optik mikroskop, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Epitaksiyel grafen numunelerinin tabaka kalınlıklarını belirlemek için Raman ölçümü yapılmıştır. Grafen aygıtların fabrikasyonu için Optik ve Elektron-demeti litografi yöntemleri kullanılmıştır. Üretilen grafen aygıtlar kullanılarak grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiş grafen numunelerinin I-V (akım-voltaj) karakteristikleri ölçülmüştür. Işık, grafenin manyetoiletim özellikleri üzerine etkisini incelemek için, sabit manyetik alan altında (4,5 kG), karanlık ve daha sonra aydınlık koşullarda, 25–300 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümleri yapılmıştır. Helyum gazının ve suyun epitaksiyel grafenin Hall ölçümleri üzerine etkilerini incelemek için sabit manyetik alan altında, 30–300 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Ayrıca, grafen tabakaları ile helyum gazının etkileşmesini daha iyi anlamak için Atomistix ToolKit (ATK) yazılımı kullanılarak DFT (yoğunluk fonksiyon teorisi) hesaplamaları yapılmıştır.

2. GRAFENİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Tarihi

Grafit, 6000 yıl önce çömlek süslemek için kullanılmaya başlamasına rağmen, grafitin izole bir tek-atom düzlemi olan grafen hakkındaki araştırmalar 1960'lara uzanır [12]. 20. yüzyılın sonlarında grafen elde etmek teorik ve deneysel açıdan zorlu bir iş olarak düşünülürken, ince grafit ya da grafen tabakalarından üstün elektriksel özellikler belirlemek umuduyla grafenin araştırılması yavaş yavaş artmaya başlamıştır. Teorik hesaplamalara ve deneysel gözlemlere dayanılarak, genellikle 2-boyutlu (2-B) malzemelerin 3-boyutlu (3-B) taban olmadan var olamayacağı düşünülüyordu. Daha sonra yapılan *Ab-initio* hesaplamaları, bir grafen düzlemin boyutu yaklaşık 20 nm'den daha küçük ise onun diğer fulleren yapılarına göre termodinamik açıdan kararsız olacağını göstermiştir [13]. Grafen, yaklaşık 6000 atoma kadar en az kararlı yapıdadır ve sadece 24,000 karbon atomundan daha büyük boyutlar için en kararlı yapıyı oluşturur (grafit içindeki gibi). Karbon nanotüplerin büyütülmesinde kullanılan, metal yüzeyler üzerine kimyasal buhar biriktirme (birkaç tabaka grafen) ya da SiC'nin termal ayrıştırılması gibi yöntemlerle aynı yaklaşımı kullanarak grafen sentezlemek için çeşitli denemeler yapılmıştır [14-16]. Bu yaklaşımlar ile mükemmel tek tabaka grafen üretilmemesine rağmen, çalışmalar bir kaç tabakalı grafenin yüksek taşıyıcı hareketliliğinin olduğunu ve günümüzde kullanılan çeşitli üretim teknikleriyle daha kaliteli grafen tabakalarının üretilbildiğini göstermiştir. 2004 yılında Novoselov ve Geim izole grafen elde etmek için, grafeni buluna kadar selobant ile grafiti pul pul soyma yöntemini kullandı [17] (buna benzer bir yöntemi genç Kaleb yapmıştı [12]). Böyle basit bir yaklaşımla yüzlerce mikron boyutunda yüksek kaliteli grafen elde edilebilir. Bu yüksek kaliteli grafen kristalleri, şaşırtıcı özelliklerinin incelenmesine olanak sağlar. O zamandan beri, alttaş üzerindeki grafen tabakalarının kontrolü dahil, grafenin araştırılması, işlevsel grafen ve grafenin uygulamaları keşfedilerek, üstel olarak büyüdü. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi grafen üzerine yapılan yayınların sayısı 2004 yılından sonra önemli ölçüde artmıştır. Tek tabaka karbon yapısının araştırılmasında "grafit tabakası" terimi uygun değildi çünkü "grafit" üç boyutlu bir yığın yapısı olarak

tanımlanmıştı, bu nedenle "grafit tabakası" terimini değiştirmek için ilgili IUPAC komisyonu tarafından "grafen" terimi önerildi. Fulleren, nanotüp, grafit gibi grafitik malzemelerin temel yapı bloğu olan grafenin son tanımı; karbon atomlarının iki boyutlu bir tek tabakası olarak kararlaştırılmıştır [12].



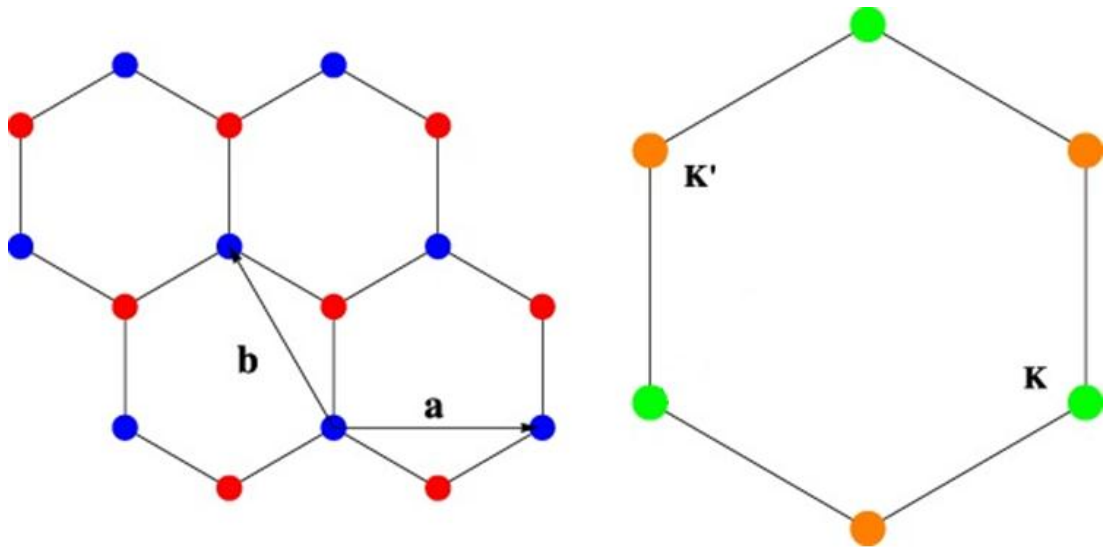
Şekil 2.1. Yıllara göre grafen üzerine çıkan yayın sayısı [12].

Şek. 2.1 incelendiğinde grafenin ilk kez bulunduğu 2004 yılından sonraki üstel artış net olarak görülmektedir. Grafen üzerine yapılan çalışmalar günümüzde hala yüksek bir hızla artışını sürdürmektedir. Aynı şekilde uygulama alanları, karbon temelli olması nedeniyle sadece fizik ve kimyada değil, biyoloji ve tıp gibi birçok alanda da artmaktadır.

2.2. Atomik Yapısı

Grafen karbonun 2-B bir allotropudur [18]. Diğer allotropları: fulleren, karbon nanotüp, grafit ve elmadır. Elektronların serbestlik derecesine göre; fulleren: sıfır-

boyutlu (0-B), karbon nanotüp: bir-boyutlu (1-B), grafit ve elmas: 3-B malzemelerdir [19]. Karbonun allotropları arasında 2-B ve kararlı olan tek yapı grafendir. Ayrıca karbon allotroplarının hepsi grafenden sentezlenebilir ve grafendeki karbon atomları oldukça simetrik balpeteği örgüsü şeklinde dizilmiştir. Grafendeki sp^2 bağları ise karbonun valans elektronlarının hibritleşmesinden kaynaklanır. Bu sp^2 hibritleşmesi, düzlemde bir 2s ve komşu üç karbon atomunun 2p orbitallerinin birleşmesiyle meydana gelir. Boşta kalan p_z orbitalleri sayesinde grafen ilginç elektronik özelliklere sahip olur ve bunlar C-C bağlarının olduğu düzleme diktir. C-C bağları güçlü kovalent bağlardır ve grafenin kararlı bir yapı olmasında etkilidir [20-23]. Boşta kalan p_z orbitalleri grafitteki farklı grafen tabakalarının birbirlerine bağlanmasını sağlar ve zayıf van der Waals bağlarını oluşturur. Bu nedenle grafen tabakaları birbirinden ayırmak oldukça kolaydır.



Şekil 2.2. Tek tabaka grafenin balpeteği örgü yapısı ile $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ ile gösterilen temel örgü vektörleri. Ters örgü Brillouin bölgesi K ve K' ile gösterilmiş Dirac noktalarıyla bir altıgendir [24].

Grafen yapısında komşu C-C atomları arasındaki bağ uzunluğu $a \approx 0,142$ nm. İki karbon atomunu kapsayan birim hücre biçimindeki $\vec{a}_1$ ve $\vec{a}_2$ örgü vektörleri aşağıdaki gibi verilir:

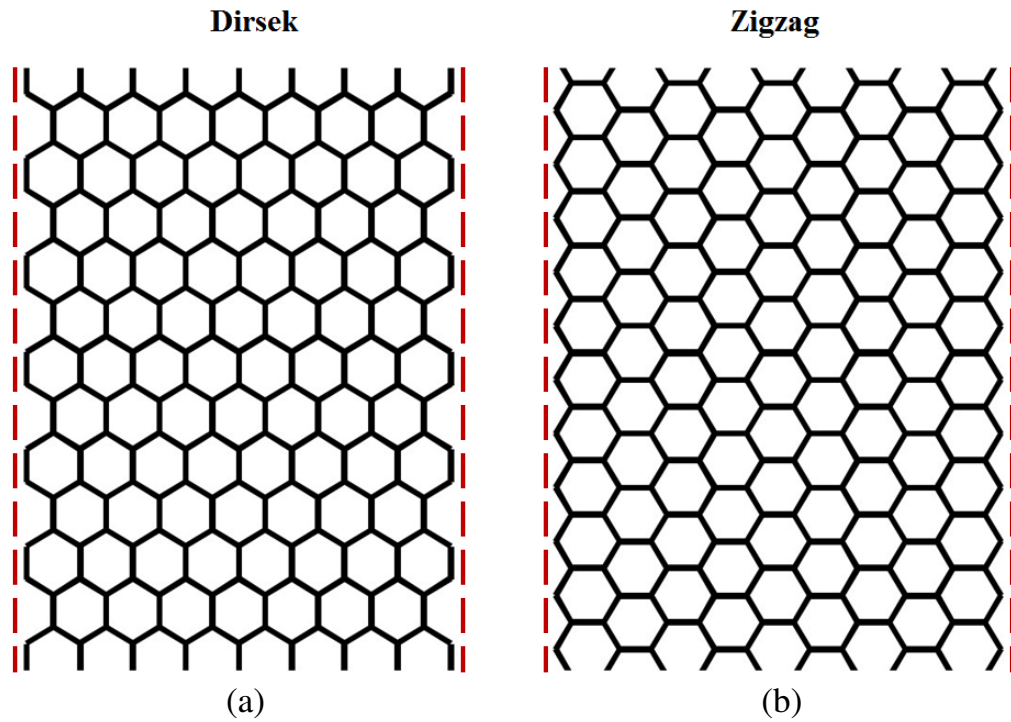
$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}, 0) \quad \vec{a}_2 = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3}, 0). \quad (2.1)$$

Ters örgü vektörleri:

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{3a}(1, \sqrt{3}, 0) \quad \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{3a}(3, -\sqrt{3}, 0). \quad (2.2)$$

Grafenin Brillouin bölgesinin köşesindeki Dirac noktası olarak isimlendirilmiş iki nokta ise aşağıdaki gibi verilir.

$$K = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right) \quad K' = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right). \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. Grafenin (a) Dirsek ve (b) Zigzag geometrisi [25].

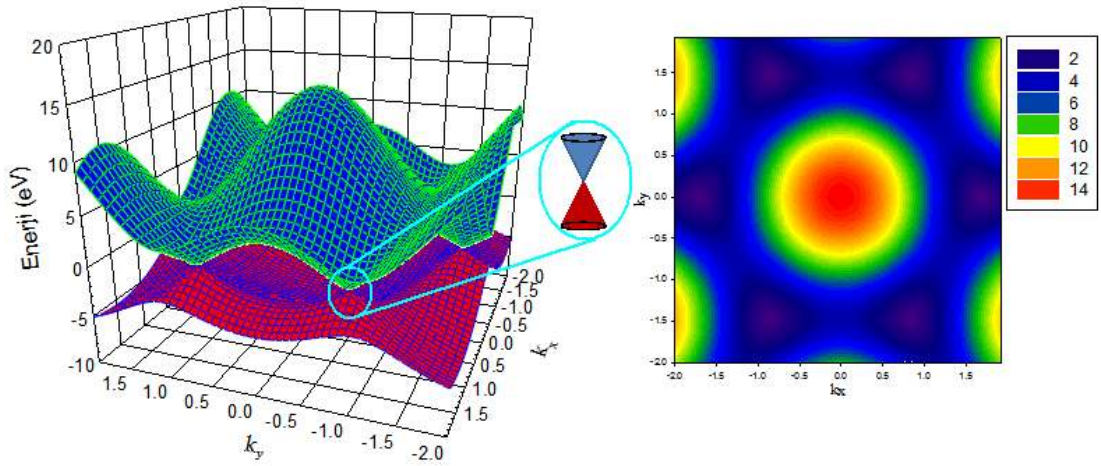
Grafenin sadece geometrisi değiştirilerek farklı elektriksel özelliklere sahip grafen şeritler elde edilebilir. Şekil 2.3’de gösterilen zigzag geometriye sahip grafen

nanoşerit metalik ve yarıiletken özellik sergilerken dirsek geometriye sahip olan grafen nanoşerit metalik özellik sergiler [26].

2.3. Özellikleri

2.3.1. Elektronik özellikleri

Grafen, sıfır band aralığı nedeniyle, teorik ve deneysel açıdan mükemmel yakın bir elektronik iletken malzemedir [10]. Elektronların enerjisi, Brillouin bölgesi kenarlarındaki elektronların momentumu ile doğrusal olarak ilişkilidir (elektronlar kütsüz Dirac fermiyonları gibi davranır). Ayrıca, grafen düzlüklerde balistik iletim gözlenir. Grafenin band yapısı ilk kez 1947 yılında sıkı-bağ modeli kullanılarak elde edilmiştir [27].



Şekil 2.4. Solda; bir grafen düzlüğünün band yapısı. İletim ve valans bantları bir huni biçimindedir. Sağda; band yapısının üstten görünüşü.

Grafen sahip olduğu yüksek taşıyıcı hareketliliği, mekanik ve ısı kararlılığının iyi olması, çok iyi ısı iletken olması ve elektromigrasyona karşı dirençli olması nedeniyle yüksek frekans analog uygulamalar için uygundur. Grafenin yüksek elektron hareketliliği geniş bir küçük sinyal geçişiletkenliği (g_m) sağlayabilir (g_m bir amplifikatörün kazancını ve bir transistörün yüksek frekans performansını belirleyen önemli bir parametredir) [28]. Grafen transistörlerdeki kanallar, mikrometre

genişliğindeki grafen tabakalar ya da grafen şeritlerden oluşur ve grafenin band yapısından dolayı grafen transistörler ambipolar akım iletimi sergilerler [29]. Grafende taşıyıcılar hem elektronlar hemde deşikler olabilir. Bir grafen alan etkili transistörde (GFET) geçit gerilimini değiştirerek taşıyıcı tipini kontrol etmek de mümkündür. Grafende iletim ve valans bandı huniye benzemektedir (Şekil 2.4) ve bu huni şeklindeki valans ve iletim bandının birbirine en yakın olduğu noktalar Dirac noktalarıdır. Dirac noktalarında, elektronların ve deşiklerin sayısı eşit fakat taşıyıcıların yükleri zıt olduğundan, bu noktalar yüksüzdür. Bu nedenle, Dirac noktalarında iletim minimum değerini alır. Dirac noktasına ayrıca minimum iletim noktası da denir [30].

Grafenin elektronik özellikleri aşağıdaki klasik sıkı-bağ modeli ile belirlenebilir.

$$E(k_x, k_y) = \pm \gamma_1 \sqrt{1 + 4 \cos\left(\frac{3a_0}{2} k_y\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}a_0}{2} k_x\right) + 4 \cos^2\left(\frac{\sqrt{3}a_0}{2} k_x\right)} \quad (2.4)$$

Burdaki $\pm$ işareti iki çözümün olduğunu gösterir ve (-) bağlanmaya, (+) ise anti-bağlanmaya karşılık gelir. $a_0 \approx 2.46 \text{ Å}$ örgü sabitidir. Bu şekilde Brillouin bölgesinin kenarlarındaki altı noktada valans ve iletim bandları birbirlerine temas eder. Bu noktalar, K ve K' noktaları olarak isimlendirilir.

2.3.2. Mekanik özellikleri

Grafende C-C bağları arasında kuvvetli kovalent bağlar olduğu için bir grafen düzlük olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir. Grafiti oluşturan grafen düzlüklerin arasında ise zayıf van der Waals bağları olduğu için grafen düzlükler çok az bir kuvvet uygulandığında birbirlerinin üstünden kayarak grafit yapısını bozabilir [31].

Bir malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için üç parametre gereklidir: Malzemenin sertliğini tespit eden Young modülü, Poisson oranı ve makaslama modülü. Poisson oranı ve makaslama modülü tek tabaka grafen üzerinde deneysel

olarak doğrulanmadı fakat hesaplamalar yönteme dayalı değerleri sağlamıştır. Bir malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi, nanografen yapıların ve aygıtların kontrol edilmesi ve tasarlanmasında çok faydalı ve önemlidir. Bu nedenle, birçok araştırmacı grafen düzlüklerin Young modülünü ölçmek için deneysel yöntemler ve moleküler dinamik simülasyonları uygulamıştır. Araştırmacılar, atomik kuvvet mikroskobu kullanarak 5 tabakadan daha az grafen yığınının etkin yay sabitini ölçmüşler ve Young modülünü çıkarabilmişlerdir [32]. Tek tabaka grafen için ise Young modülü 1500 GPa bulunmuştur [33]. Geim'in çalışması esas alınarak Avrupa topluluğunun oluşturduğu STCF (Bilim ve Teknoloji Hizmetleri Konseyi) tarafından hazırlanan Çizelge 2.1'de grafen ve diğer farklı malzemeler için termal iletkenlik ve Young modülleri gösterilmiştir [34]. Çizelgede, grafenin termal iletkenliğinin ve Young modülünün diğer malzemelere göre daha büyük olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1. Bazı yarıiletken malzemeler ve grafenin termal iletkenliği ve Young modülü.

Malzeme	Termal İletkenlik (W/cm.K)	Young Modülü (10^9 Pa)
Grafen	~ 50	1500
Karbon Nanotüp	~ 35	~ 1000
Elmas	10 ~ 22	1050 ~ 1200
Si	1,4	131
Ge	0,6	103
SiC	4,1	450

Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi karbonun allotropları (grafen, karbon nanotüp ve elmas) diğer malzemelere göre daha yüksek termal iletkenlik ve Young modülü sergilemektedir.

2.3.3. Optik özellikleri

Grafen inanılmaz derecede iletken ve dayanıklı olmasının yanı sıra optik geçirgenliği nedeniyle çalışmak için çok caziptir. Grafen ince olduğu için fotonlar içinden kolaylıkla geçebilir. Ayrıca, grafen sadece bir atom kalınlığında olmasına rağmen

şaşırtıcı derecede yüksek soğurma oranına sahiptir. Grafen üzerine gelen beyaz ışığın % 2,3'ü bir tek tabaka grafen düzlük tarafından soğurulur [35]. Şaşırtıcı olarak, bu değer tam olarak $\pi\alpha$ 'ya eşittir. Burada α ince yapı sabitidir ($e^2/\hbar c$) [36]. Bu 2-B Dirac fermiyonlarını içeren kuantum mekanik prensipler kullanılarak elde edilebilir [37]. Ayrıca, Pauli engellemesi nedeniyle, $2|E_F|$ 'den düşük enerjili fotonların bandlar arası soğurulması bastırılır. Burada, E_F Fermi seviyesi ve Dirac noktasındaki enerji farkıdır. Uzak IR (uzak kızıl berisi) ve terahertz bölgelerinde ise bandlar arası geçişler ya da serbest taşıyıcılar baskındır [38].

Tüm karbon atomları bazı özel dalga boylarındaki ışığa karşı belirli bir yakınlık gösterir. Bu dalga boyları karbon-karbon bağlarının sp^2 titreşim modlarına karşılık gelir. Karbon malzemesi herhangi bir yüksek enerjili ışıkla uyarıldığında fotonlar bu dalga boylarında tekrar ışımalıdır. Moleküler titreşim modlarını uyarma tekniği ve tekrar ışımalı ışık ölçümleri Raman spektroskopisi olarak bilinir ve grafen belirlemenin en güvenilir yollarından biridir.

Grafen ve alttaş arasında belirli etkileşimler meydana geldiği için optik mikroskop altında grafen tabakaları belirlemek zordur. Fakat grafen ve alttaş arasındaki kontrast farkından, grafen tabakaları belirlemek mümkündür [39].

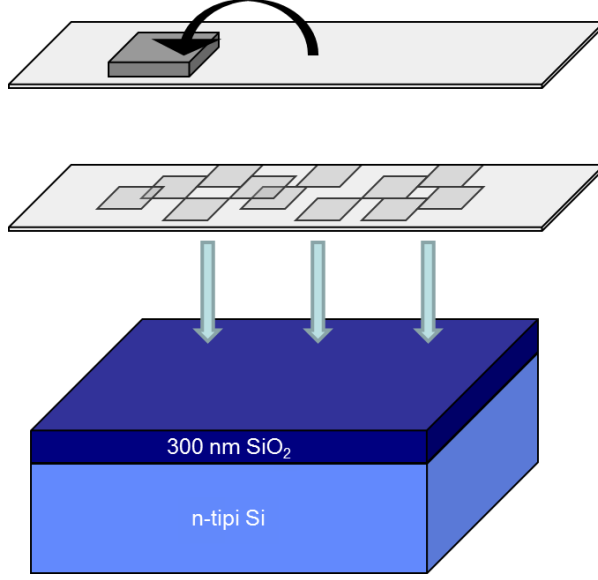
2.4. Sentezi

Grafenin ilk sentezi 2004 yılında rapor edildi. Grafen üretmek için kullanılan ilk yöntem ise Novoselov ve Geim'in kullandığı grafit soyma yöntemidir [17]. Sonraki yıllarda daha başarılı grafen elde etme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan grafen numuneleri, grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiştir.

2.4.1. Grafit soyma

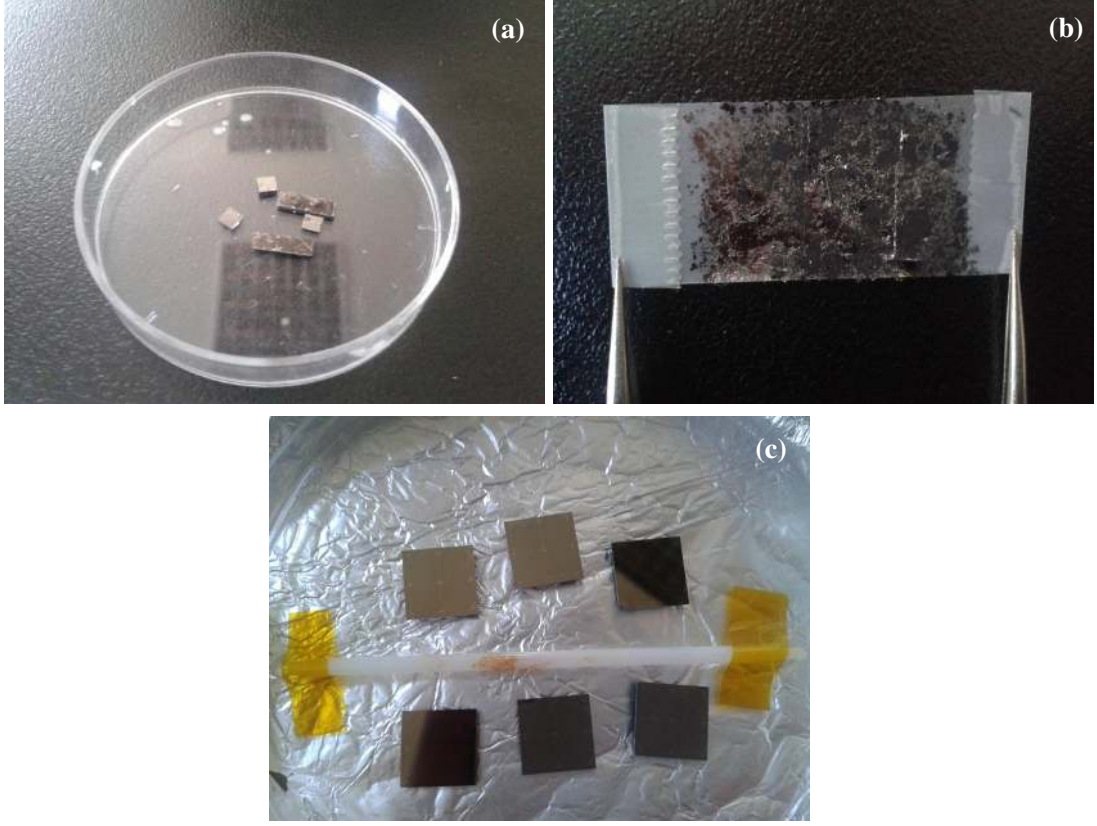
Novoselov ve Geim tarafından 2004 yılında geliştirilen grafit soyma yöntemi, grafen elde etmek için kullanılan en basit ve etkili yöntemlerden biridir [17]. Fakat bu

yöntem; istenilen boyutta ve istenilen yerde grafen tabakası elde etmek için çok uygun değildir.



Şekil 2.5. Grafit soyma yöntemi.

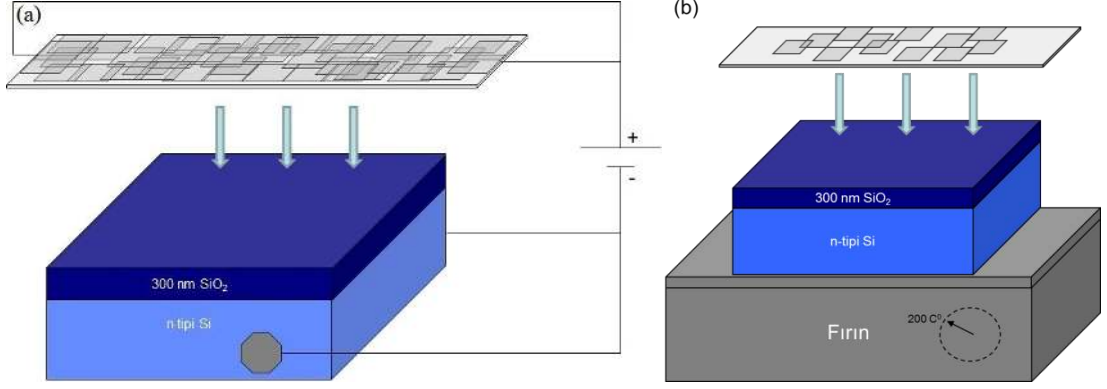
Grafit soyma yöntemi için gerekli olan malzemeler şunlardır: HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite), cımbız, bant ve SiO₂/Si alttaşlar. Bu yöntemde, ilk olarak HOPG, bant yüzeyine yapıştırılır ve grafit tabakalarının koparak bant yüzeyine dağılması sağlanır (Şekil. 2.5). Grafit parçaları bant yüzeyine dağıldıktan sonra bant, bu son haliyle, SiO₂/Si alttaş üzerinde yapıştırılır ve plastik bir çubuk ile bant yüzeyine kuvvet uygulanarak grafen tabakalarının SiO₂/Si alttaş yüzeyine yapışması sağlanır. Grafit soyma yöntemi için gerekli olan temel malzemeler Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Grafit soyma yöntemi için gerekli olan temel malzemeler: (a) HOPG, (b) bant ve (c) SiO₂/Si alttaşlar.

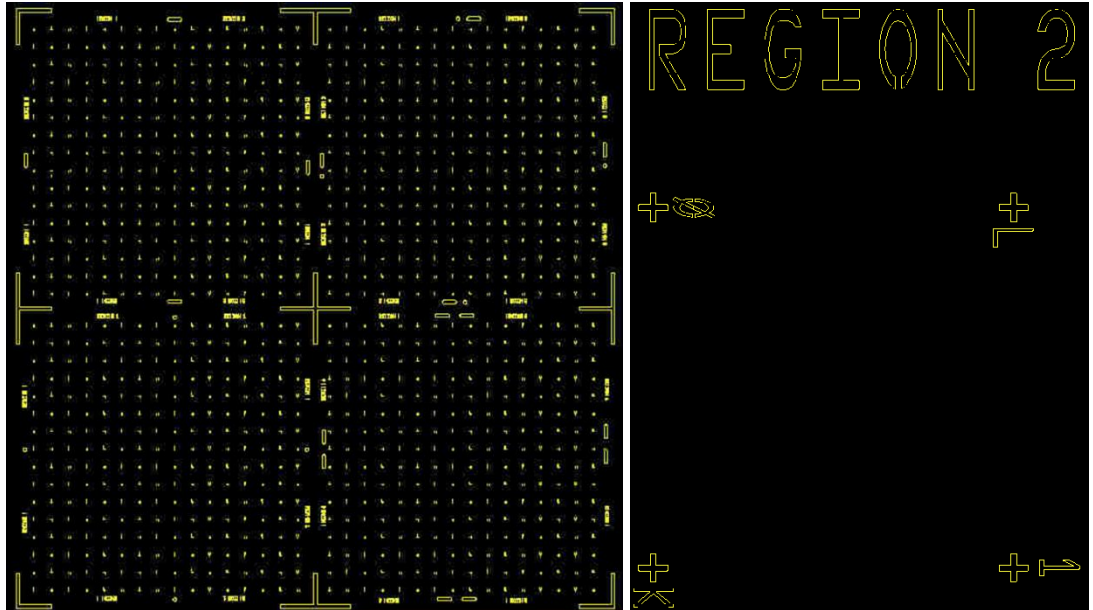
Bu tez çalışmasında, grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafen tabakalarının kalitesini ve miktarını artırmak amacıyla grafit soyma yöntemi üzerine DC gerilim işlemi ve ısıtım işlemi olmak üzere iki farklı işlem uygulanmıştır. Epitaksiyel grafenler ise bunlardan çok farklı bir işlemle elde edilmiştir. DC gerilim işleminde; HOPG bant yüzeyine yeterince dağıtıldıktan sonra bantın grafitle kaplı olan yüzeyine DC güç kaynağının pozitif (+) kutbu, yüksek *n*-tipi katkılı Si alttaşa ise negatif (-) kutbu bağlanacak şekilde ayarlandı ve elektrik alanın bant yüzeyinden SiO₂/Si alttaş yüzeyine yönelmesi sağlandı. Sonraki adımda, bant SiO₂ yüzeye yapıştırıldı ve plastik bir çubukla bant yüzeyine çok az kuvvet uygulanarak elektrik alanın da etkisiyle grafit yüzeyindeki tek tabaka grafen parçalarının koparak SiO₂ yüzeye yapışması amaçlandı [40]. Sırasıyla $3,3 \times 10^7$ V/m, $6,7 \times 10^7$ V/m ve 10×10^7 V/m elektrik alan uygulandı. İşlem tamamlandıktan sonra, SiO₂ yüzeyi üzerinde grafen tabakaları olduğu düşünülen SiO₂/Si alttaş, ultrasonik temizleyici cihazında,

izopropil alkol içinde 3 dakika titreştirilerek yüzeydeki büyük grafit parçalarının ve bant kalıntılarının temizlenmesi sağlandı.



Şekil 2.6. (a) DC gerilim işlemi ve (b) ısıl işlem.

Isıl işlemde; yüzeyine HOPG dağıtılmış bir bant, 200 °C sıcaklıktaki bir fırın üzerinde sırasıyla 5, 10 ve 15 saniye ısıtılan farklı SiO₂/Si alttaşlar üzerine yapıştırıldı ve DC işlemden sonra yapıldığı gibi ultrasonik temiyileyici cihazında isopropanol ile yüzeyi temizlendi. Bu sonuçlar deneysel teknikler bölümünde, optik mikroskop başlığı altında ayrıntılı olarak anlatıldı.

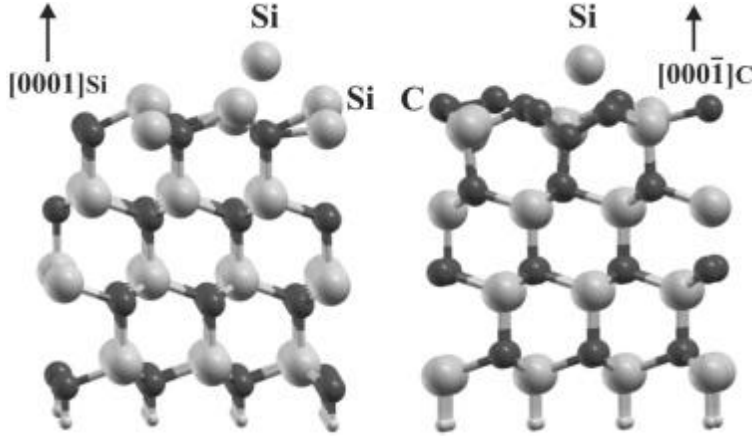


Şekil 2.7. SiO₂ yüzey koordinatları. Sağda büyütülmüş bir görüntüsü gösterilmiştir.

SiO₂ yüzey üzerindeki grafen tabakalarının yerini kolaylıkla belirleyebilmek için yüzeye elektron demeti litografisi ile metal koordinatlar yazılmıştır. Yüzeyin herhangi bir bölgesine yapışan grafen tabakaların yeri optik mikroskop yardımıyla belirlendikten sonra, bu koordinatlar (Şekil 2.7) sayesinde metal kontaklar için tekrar litografi işlemi yapılmak istendiğinde grafen tabakalarının yerleri kolaylıkla bulunabilir. Bu tez çalışmasında kullanılan alttaşılarıdaki SiO₂ kalınlığı 300 nm. SiO₂ kalınlığı, optik mikroskop altında kontrast farkından grafen tabakaların yerini belirlemede oldukça etkilidir. SiO₂ kalınlığı 90 nm iken yüzeydeki grafen tabakaları mikroskop altında daha net olarak görülebilir [41].

2.4.2. Epitaksiyel büyüme

İnce grafen tabakalar deneysel olarak izole edildikten sonra, daha kaliteli grafen elde etmek için diğer teknikler de hızla gelişmeye başlamıştır. Ancak geniş alanlı grafen elde etmek günümüzde hala çok kolay değildir. Geliştirilen bu yöntemler arasında, geniş alan grafen elde etmek için en umut verici olan; SiC alttaştan Si süblimleştirerek epitaksiyel grafen büyümedir. SiC alttaş üzerine büyütülen epitaksiyel grafenin tabaka sayısı ve grafen düzlüklerin boyutları kolaylıkla kontrol edilebilir [42, 43]. Ancak, epitaksiyel grafen numunelerinin hareketliliği grafit soyma yöntemiyle elde edilmiş grafen tabakalarına göre nispeten daha azdır [44]. Süblimleştirmeden sonra iki süreç takip edilir: UHV (ultra high vacuum) ortamında ya da argon ortamında grafen büyüme. İkinci durumda (argon ortamında grafen büyütülürken) reaktör basıncına bağlı değişiklikler olur. Bu yöntem, süblimleşme sıcaklığı 1600 °C'yi aştığı için uygulanmıştır. Grafenin büyütülmesi, indüktif bir RF jeneratörü kullanılarak ısıtılan yatay kimyasal buhar biriktirme (CVD) sıcak-duvar reaktörü ile yapılabilir. Epitaksiyel karbon filmler yarı yalıtkan 4H ve 6H politipli, (0001)/(000 $\bar{1}$) farklı polariteli SiC alttaşlar üzerine, bu reaktör kullanılarak farklı koşullarda büyütülebilir [45]. Farklı polariteli SiC alttaşın şematik görünüşü Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



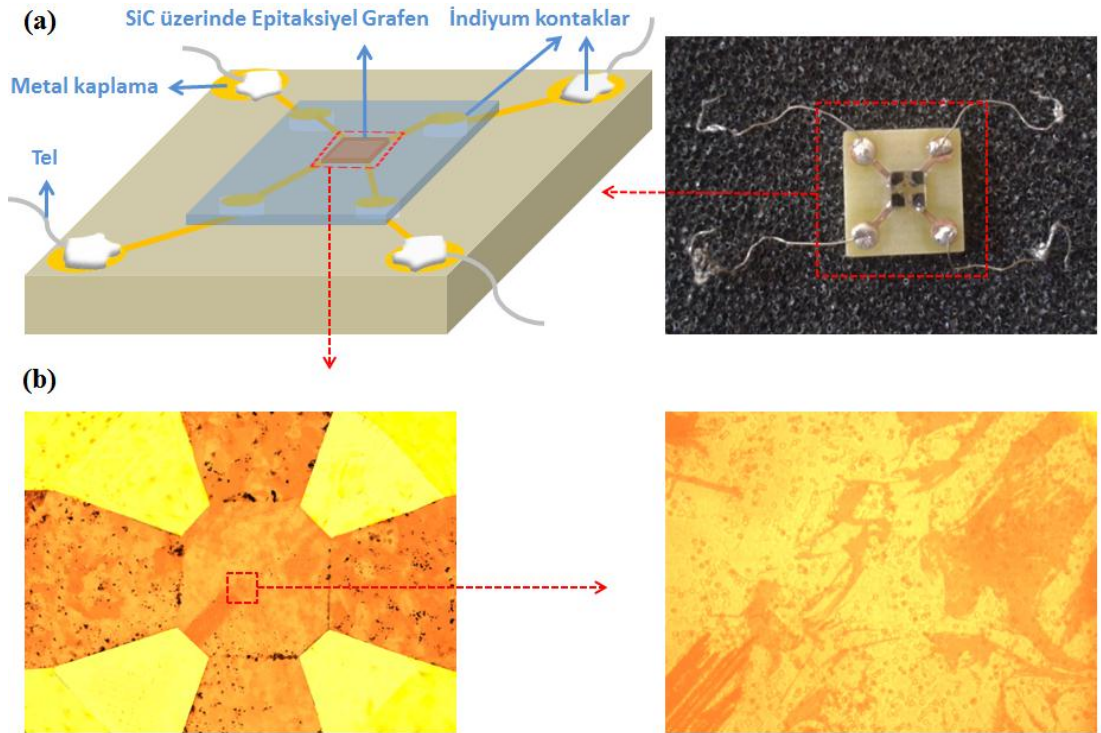
Şekil 2.8. Si ve C ile sonlandırılmış silisyum karbürün yandan görünüşü [46].

Bu tez kapsamında ölçümü alınan epitaksiyel grafen numuneleri 932 ve 934 kod numaraları ile anılacaktır. Epitaksiyel grafen numuneleri Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) tarafından sağlanmıştır. 932 numunesi için grafen tabakalar, bir radyo frekans jeneratörü tarafından ısıtılan Epigress VP508 SiC hot-wall CVD reaktörü içinde, 4H-SiC ve 6H-SiC alttaşlarının silisyum ve karbon yüzü üzerine büyütülmüştür. İlk olarak, SiC alttaşlar 1600 °C'ye yakın bir sıcaklıkta karışık hidrojen (H_2) ve propan (C_3H_8) atmosferinde aşındırıldı. Daha sonra, alttaş 1600 °C sıcaklık ve 20 mbar gaz basıncında yaklaşık 20 dakika boyunca argon atmosferinde tavlandı. Tavlama, silisyum atomlarının buharlaşmasına neden olur ve daha az uçucu olan karbon atomları ile çok tabakalı grafenin oluşmasına yol açar. 934 numunesi de Si ve C polariteli farklı alttaşlar üzerine büyütülen 932 numunesi ile benzer şekilde büyütülmüştür. İki numunenin büyütme koşulları arasındaki tek fark, 934 numunesinin büyütme zamanının 932 numunesinin büyütme zamanından iki kat fazla olmasıdır.

3. DENEYSEL TEKNİKLER

3.1. Numune Hazırlama

Grafit soyma yöntemiyle grafen elde etmeden önce SiO_2/Si alttaşlar üzerine elektron demeti litografisi ile koordinatlar yazıldı (Şekil 2.7). Daha sonra, SiO_2/Si alttaşları temizlemek amacıyla, alttaşlar saf su içine bırakıldı, bir süre beklendi. Saf su içinden çıkarılan her bir SiO_2/Si alttaş sırasıyla öncelikle asetonda daha sonra da isopropanolde temizlendi. SiO_2 yüzeyine kuru hava verilerek isopropanolün yüzeyden buharlaşması sağlandı. Alttaşlar grafit soyma işlemine hazırlandıktan sonra grafen tabaka üretimine başlandı. Üzerinde grafen tespit edilen SiO_2/Si alttaşlara ohmik kontak almak için optik litografi ve elektron demeti litografi yöntemleri kullanıldı.



Şekil 3.1. (a) Epitaksiyel grafen numuneleri için tasarlanmış numune tutucunun fotoğrafı ve şematik gösterimi. (b) Van der Pauw geometrisindeki epitaksiyel grafen numunesin optik mikroskop görüntüleri, sağdaki 20X büyütülmüş durumu.

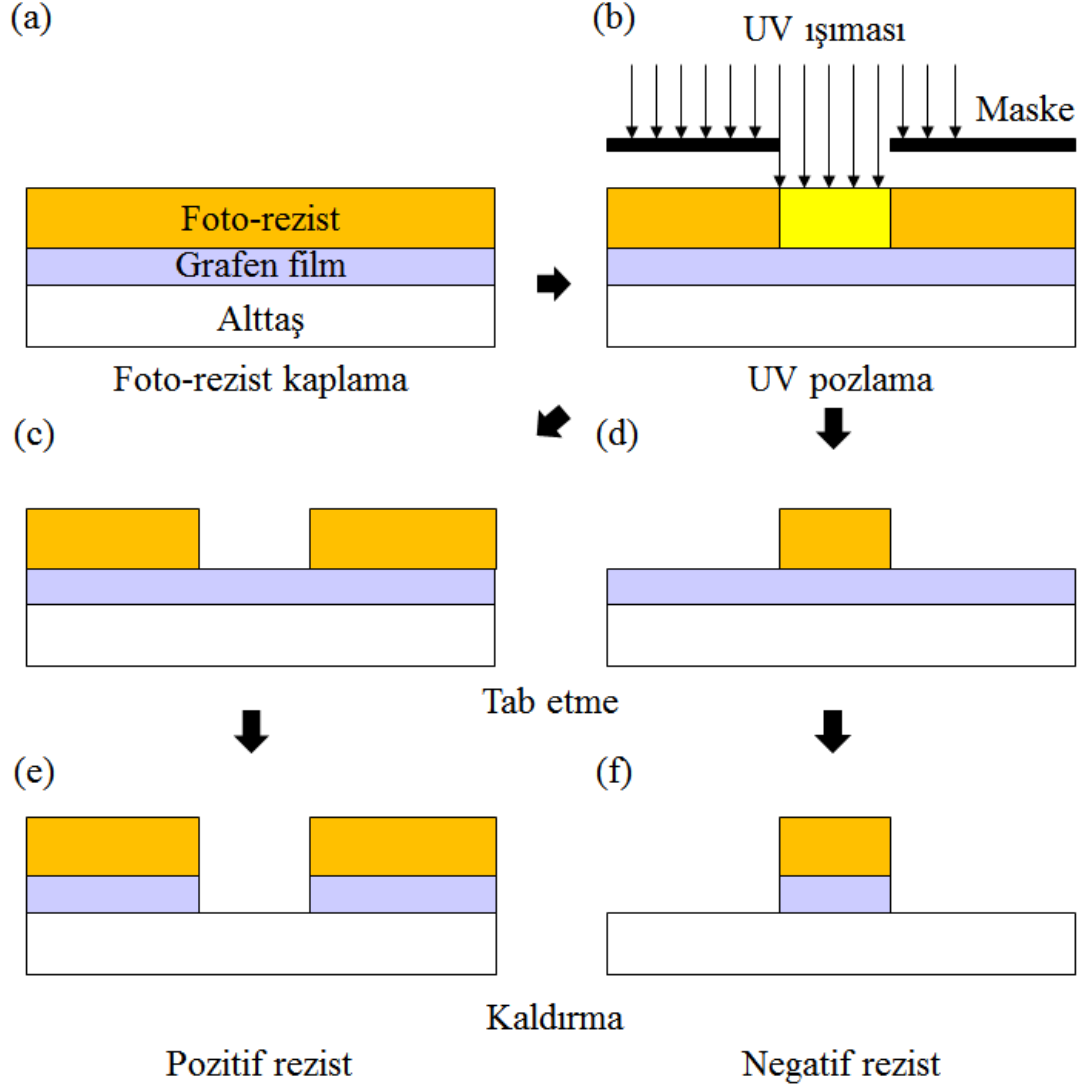
Epitaksiyel olarak elde edilen grafen numunelerine, van der Pauw tekniği ile Hall etkisi ölçümleri alabilmek için elektron demeti litografisi ile van der Pauw yapısı oluşacak şekilde metal kontaklar yazıldı. Van der Pauw geometrisinde metal kontak yazılan epitaksiyel grafen numunelerinin kontak pedleri çok küçük olduğu için özel olarak bir numune tutucu tasarlandı (Şekil. 3.1 (a)).

Şekil. 3.1’de görüldüğü gibi epitaksiyel grafen numunesinin aktif yüzü numune tutucunun ön yüzüne dönmüş durumdadır ve SiC alttaş şeffaf olduğu için epitaksiyel grafen numunesi ve metal kaplamalar SiC alttaşın arka yüzünden görülebilmektedir. Şekil. 3.1 (b)’de optik mikroskop görüntülerinde SiC alttaş üzerindeki epitaksiyel grafen parçalarının yüzeyde parçalar halinde bulunduğu görülmektedir. Bu numune tutucu Lake Shore otomatik Hall etkisi ölçüm sisteminde kullanılarak, epitaksiyel grafen numunesi için 25-350 K sıcaklık aralığında ve sabit manyetik alan altında sıcaklığa bağlı Hall etkisi ölçümleri alınmıştır.

3.2. Optik Litografi

Bu tez kapsamında metal kontakları alınan grafen numunelerinin litografi işlemleri, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) bünyesinde bulunan optik litografi ve elektron demeti litografi sistemleri ile yapılmıştır. Optik litografi tekniği ile bir morötesi (UV) ışık kaynağı ve desenli bir maskenin ışığa dirençli olan foto-rezist üzerine düşürülmesiyle, bir alttaş ya da ince film üzerinde istenilen geometrik desen elde edilebilir. Bu teknik, mikro-fabrikasyon için kullanılan önemli bir işlemdir. Foto-rezist, pozitif foto-rezist ve negatif foto-rezist olmak üzere iki türdür ve rezisti çözmek amacıyla kimyasal bir çözelti kullanılır. Pozitif foto-rezist UV ışıma maruz bırakılırsa rezist çözücünde daha kolay çözülebilir duruma gelir. Negatif foto-rezist ise UV ışıma maruz bırakıldığında, UV ışığın düştüğü bölgedeki rezist çözücüyeye karşı daha dirençli duruma gelir ve çözücünde çözünmez. Pozitif ve negatif foto-rezist farklı amaçlar için kullanılırlar. Şekil 3.2’de pozitif ve negatif foto-rezist kullanılmasıyla yüzey üzerinde elde edilen geometrik desenler şematik olarak gösterilmiştir. Kullanılan foto-rezist malzemesini temizlemek amacıyla aseton kullanılmıştır. Optik litografi tekniğinde sırayla şu

işlemler izlenir: 1- Numune yüzeyini temizleme, 2- Foto-rezist kaplama, 3- Hafif ısıt işlem, 4- Foto-maske hizalama, 5- UV pozlama, 6- Tab etme, 7- Kaldırma.



Şekil 3.2. Pozitif ve negatif optik litografi işleminin şematik gösterimi. (c) ve (e) pozitif rezist varken uygulanan optik litografi işlemini temsil etmektedir. (d) ve (f) ise negatif rezist varken uygulanan optik litografi işlemini temsil etmektedir.

Numune üzerine foto-rezist kaplamadan önce numune temizlenir ve daha sonra döndürücü cihazında foto-rezist kaplanır. Kaplanan foto-rezistin kalınlığı genellikle 0,1 μm ile 2 μm arasındadır. Numune üzerine foto-rezist kaplandıktan sonra hafif ısıt işlem uygulanır ve foto-rezist yoğun hale getirilir. İstenilen deseni numune üzerinde

elde etmek amacıyla kuarz tabanlı krom kaplı bir foto-maske kullanılmıştır. Desenin numune üzerinde doğru bir şekilde oluşması için maskenin hizalanması gerekir ve bunun için özel ekipmanlar kullanılır. Maske hizalama ve UV pozlama için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan optik litografi sistemi (Resim 3.2) kullanılmıştır. Hizalama; numune üzerinde önceden oluşturulmuş işaretlerle foto-maskedeki işaretlerin üst üste getirilmesiyle yapılır. Foto-rezist, UV ışımaya maruz bırakıldıktan ve çözücü ile çözme işleminden sonra uzun ısıtma işlemi (~ 120 °C'de ~ 10 dakika) daha kararlı bir duruma getirilir. Ayrıca, vakum ortamında yüzey üzerindeki istenmeyen kalıntıların yüzeyden uzaklaşması sağlanır.



Resim 3.2. Karl Suss MA6 model optik litografi sistemi.

Gerçek bir proseste, minimum çözünürlük sadece kırınım etkisine bağlı değil aynı zamanda baskı prosesine de bağlıdır. UV ışımının dalga boyu ile sınırlanan çözünürlük şu şekilde yazılabilir [47]:

$$r = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (3.1)$$

Burada k_1 , uygulanan işlem için verilen bir k-faktörü olarak bilinir. λ , UV ışınının dalga boyu ve NA sistemin nümerik açıklığıdır. Eş. 1.1 ile verilen Rayleigh çözünürlük bağıntısına göre daha küçük yüzey hatları elde etmek için UV ışınının dalga boyu azaltılmalıdır [48]. Optik litografi genelde iki temel işlem adımı için kullanılır: 1- Epitaksiyel tabaka aşındırma işlemi, 2- Metalizasyon işlemi. Epitaksiyel tabaka aşındırma işleminde, görüntü foto-reziste aktarıldıktan sonra, foto-rezistin üzerinde bulunduğu epitaksiyel tabakalar korunurken açığındaki epitaksiyel tabakalar aşınır. Bu işlem sırasında uzun ısıtma işlemi uygulanır. Metalizasyon işleminde ise görüntü foto-reziste aktarıldıktan sonra istenilen metal tüm yüzeye kaplanır ve foto-rezist çözücünde çözünür, son olarak foto-rezist ve üstünde bulunan metal yüzeyden kaldırılır. Bu süreçte ısıtma işlemi uygulanmaz.

3.3. Elektron Demeti Litografisi

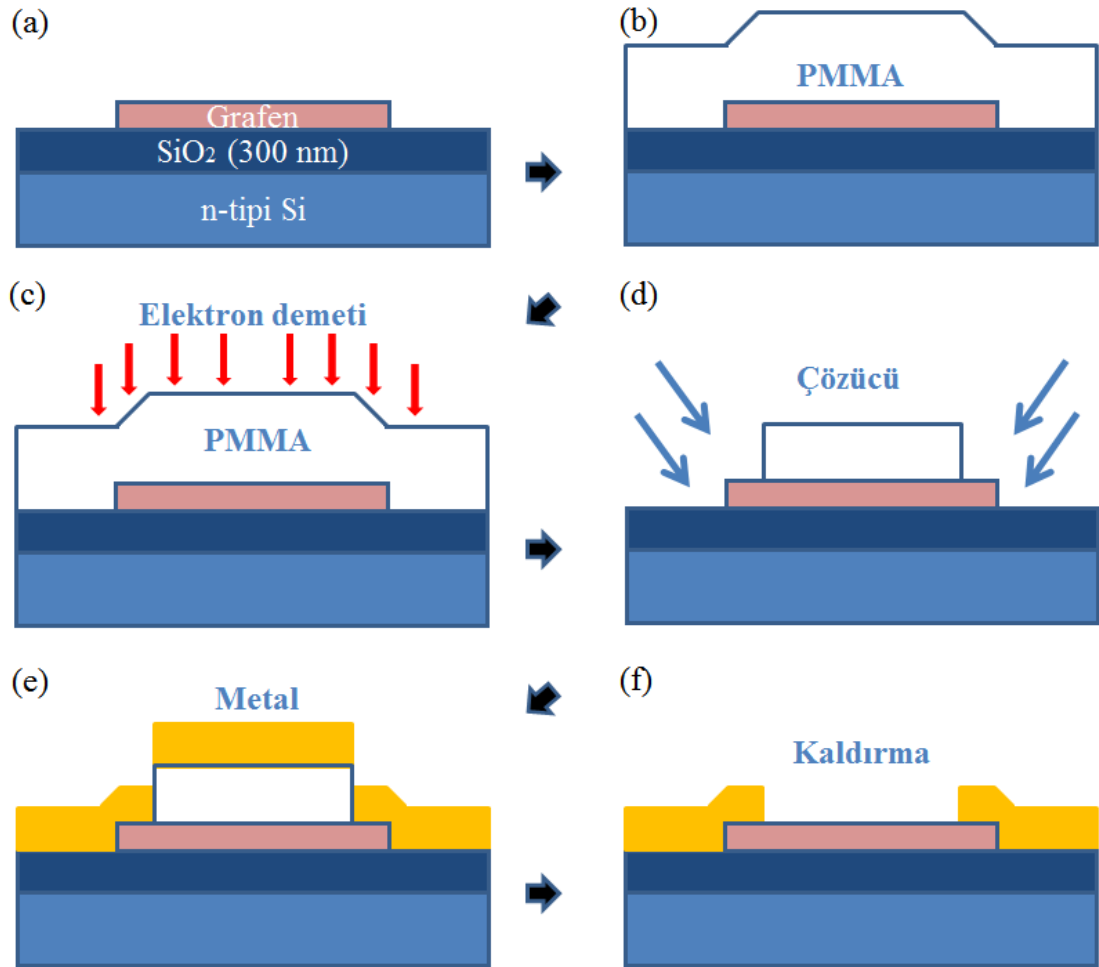
Elektron demeti litografisi sayesinde nanometre ölçeğindeki yapılara işlem yapmamız mümkündür. Bu yöntem çözünürlük sınırından kurtularak nano boyutlarda desen oluşturmayı sağlar. Bu litografi yönteminde maske kullanılmadığı ve de-Broglie dalga boyu UV ışınının dalga boyundan çok küçük olduğu için 20 nm ve altındaki boyutlarda da uygulanabilir [49]. Optik litografide maske kullanıldığı için elektron demeti litografisi kadar yüksek çözünürlük sağlamaz.

Elektron demeti litografi işlemleri için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) bünyesinde bulunan Raith e_LiNE nanolitografi sistemi kullanılmıştır (Resim 3.3). Bu sistemdeki elektron tabancası, uygun akım yoğunluğunda bir elektron demeti oluşturabilir. Elektron tabancası için bir tungsten termiyonik-emisyon katodu ya da tek kristal LaB_6 kullanılır. Elektron rezistleri bir polimerdir ve bir elektron demeti rezistinin davranışı bir fotorezist ile benzerdir [50]. Her iki rezist türündeki kimyasal ya da fiziksel değişimler ışınlamayla oluşturulur.



Resim 3.3. Raith e_LiNE nanolitografi sistemi.

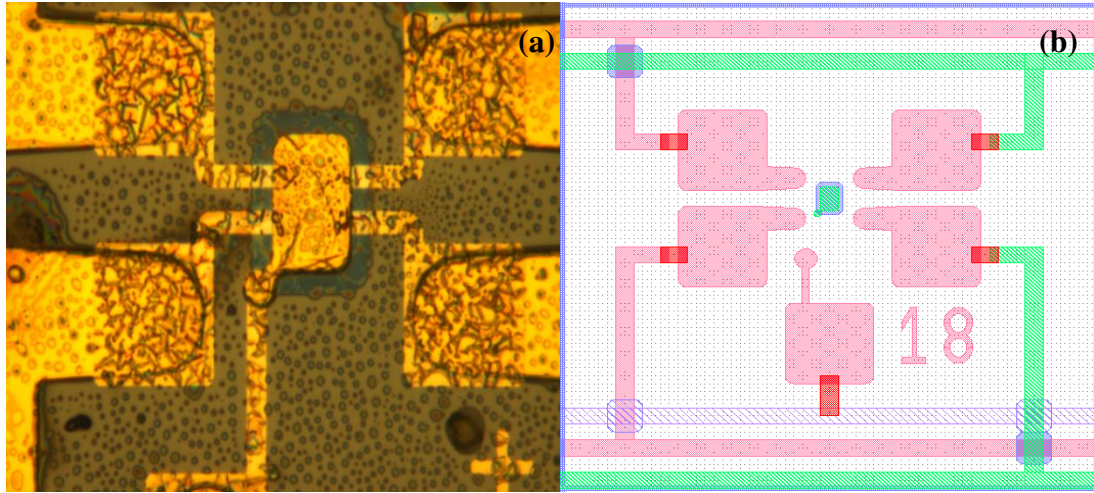
Elektron demeti litografi sisteminde taramalı elektron mikroskopunun parçalarına ek olarak desen işleyici ve lazer interferometre kontrollü numune taşıyıcısı da bulunmaktadır. Litografisi yapılacak olan desen CAD (bilgisayar destekli tasarım) programları kullanılarak çizildikten sonra desen işleyici bu çizimi elektronik sinyallere çevirir ve elektron demetini çizimde belirtilen bölgeye yönlendirir. Desen oluşturmaya başlamadan önce litografisi yapılacak olan malzeme pozitif ya da negatif bir rezist ile kaplanır. Elektron demetine maruz kalan rezist bir çözücünde rezistin türüne göre çözünür ya da çözünmez. Çözücü işlemi tamamlandıktan sonra istenilen desen oluşur. Oluşan bu desen yine aşındırma ve çözücülerin kullanılmasıyla numune üzerine aktarılır. Düşük enerjili elektron demeti litografisinde çok ince bir rezist kullanmak gerekir [49].



Şekil 3.3. Grafit soyma yöntemiyle elde edilmiş grafenlerin elektrod fabrikasyonları için litografi şeması. (a) Temiz bir SiO₂/Si alttaşı üzerinde duran bir grafen, önceikle (b) PMMA rezisti ile kaplanmıştır. (c) Daha sonra elektron demetine maruz bırakılmış rezist, (d) bir çözücü ile çözünmüştür. (e) Çözücü uygulandıktan sonra numune üzerine ince bir metal film çöktürülmüştür. (f) Son olarak rezist üzerindeki ince metal film liftoff ile kaldırılmıştır.

Elektron demeti litografisi ile bir grafen numunesi üzerine kontak metallerinin basılma işlemi sırasında, Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilmiştir. SiO₂/Si alttaşı üzerinde grafit soyma yöntemi ile elde edilmiş bir grafenin yüzeyi rezistle kaplandıktan sonra tasarlanan desen EBL sistemi ile rezist üzerine yazılmıştır. Elektron demeti rezist üzerine düşürüldüğünde rezistin atomik bağları kopar ve çözücü içinde çözünmesine neden olur [51]. Daha sonra elektron demeti buharlaştırma ile desen oluşmuş numune yüzeyine metal kaplanır. PMMA üstündeki metal filminden kurtulmak için son olarak kaldırma (liftoff) işlemi uygulanır ve

grafen numunesi üzerinde elde edilen van der Pauw geometrisindeki desen net olarak görülüyor.



Şekil 3.5. (a) Van der Pauw geometrisinde, kontakları alınmış epitaksiyel grafen numunesinin optik mikroskop görüntüsü ve (b) bunun için tasarlanmış çizim.

3.4. Raman Spektroskopisi

Grafeni tanımlamak için kullanılan yöntemlerden biri de Raman spektroskopisidir. Bu tez dahilinde, 932 ve 934 kodlu epitaksiyel grafen numuneleri için Raman spektrumuna bakılmıştır. Epitaksiyel grafen numunelerinin Raman ölçümleri Polonya'da bulunan Elektronik Malzemeler Teknoloji Enstitüsü'nde (ITME) alınmıştır.

Raman spektroskopisi bir lazerden çıkan monokromatik ışığın inelastik saçılmasına dayanır. Işık ölçümü alınan malzemedeki fononlar ile etkileşir ve lazerin enerjisinde bir kayma meydana gelir. Bu sayede, ışık verilmiş malzemedeki fonon modları hakkında bilgi edinilir. Raman spektroskopisiyle tek tabaka grafeni tanımlamak AFM ölçümlerine göre daha net sonuç verir [52, 53]. Grafitik yapıların Raman spektrumunda grafen tabakalarının tanımlanmasıyla ilgili üç özellik vardır. Bu özelliklerden birincisi; iki kat dejenere bölge merkez modu nedeniyle G piki, ikincisi kenar bölgesi fononlarının 2D bandı, son olarak da grafitteki kusurlar nedeniyle geri

saçılmadan kaynaklanan D pikinin görülmesidir. Grafenin raman spektrumunda görülen 2D modu, G' ve bazen D* olarak da bilinir ($2D = G' = D^*$) [54]. Grafitik yapıların kalınlığıyla G piki ve 2D bandının her ikisi de doğrudan ilişkilidir. Kalın grafitik yapılar için G piki Raman kayması 1580 cm^{-1} civarında meydana gelirken 2D bandı 2700 cm^{-1} civarında görülür. Ayrıca bu iki alt pik G pikinin yaklaşık olarak yarısı kadar bir yoğunluğa sahiptir. Raman kayması; tek tabakalı bir grafende olduğu gibi, kalın yapılar içinde aynı konumda yalnız bir 2D piki bulunmaktadır. Ancak bu pikin yoğunluğu G pikinin yoğunluğundan dört kat daha fazladır. Ayrıca G piki kimyasal katkılama nedeniyle grafen için bir kaç cm^{-1} kaymaya uğrar. D piki ise grafitik yapılardaki mevcut kusur yoğunluğunun bir ölçüsü olarak kullanılır. Tek tabaka bir grafene göre özellikle numune kenarlarında kalın grafitik yapılar için genellikle iki tane çok keskin D piki görülür [52]. Bunlara ek olarak: Raman spektroskopisi tek tabaka grafenlere zarar vermeden belirlemek için çok etkili bir araç olarak düşünülmektedir. Fakat iki ya da üç tabakalı grafenleri kendi aralarında ayırt etmek için çok kullanışlı ve pratik bir yöntem değildir.

3.5. Grafenin Yüzey Karakterizasyonu

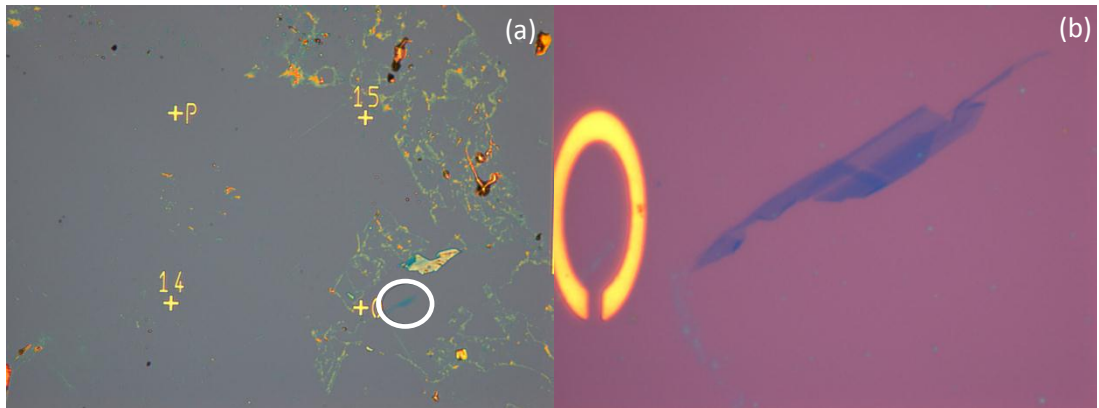
3.5.1. Optik mikroskop

Optik mikroskop, SiO_2 yüzeyi üzerindeki ince grafen tabakalarının yerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Grafen tabakası ve SiO_2 yüzeyi arasındaki kontrast farkından ince grafen tabakalarının yeri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafen tabakalarının ve SiO_2 yüzeyinin yapısı ilk olarak optik mikroskopla incelenmiştir. Nununelerin yüzey analizi Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesindeki Leica DM6000 M optik mikroskobu (Resim 3.4) ile yapıldı. Kullanılan bu optik mikroskop ile SiO_2 yüzeyindeki bir grafen parçasının görüntüsünü 1000 kata kadar büyütürken görüntü almak mümkündür. Ayrıca ışık şiddeti değiştirilerek istenilen netlikte görüntü elde edebilmek mümkündür.



Resim 3.4. Leica DM6000 M optik mikroskobu.

Leica DM6000 M optik mikroskobu kullanılarak alınmış bir SiO_2 yüzey görüntüsü Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

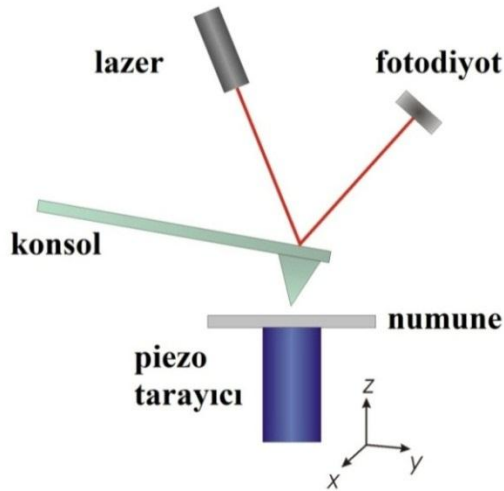


Şekil 3.6. SiO_2 yüzeyi üzerinde (a) 20X ve (b) 100X büyütülmüş BG044-R3O15 numunesinin optik mikroskop görüntüsü (grafen tabakasının bulunduğu bölge (a)'da beyaz çember ile gösterilmiştir).

SiO₂ yüzeyi pembe renge daha yakinken onun üzerindeki grafen tabakası mavi tonlarda görülüyor aralarındaki kontrast farkından grafen tabakasını belirlemek oldukça kolay. Fakat daha ince grafen tabakaları SiO₂ yüzeyine daha yakın renkte olacağından farkedilmeleri daha zor olmaktadır. İnce grafen tabakasının SiO₂ yüzeyinin rengine daha yakın olduğu Şekil 3.6 (b)'de açıkça görülmektedir.

3.5.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilen grafenlerin yüzey özelliklerini incelemek ve grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafenlerin kalınlığını belirlemek için AFM kullanılmıştır. 1986 yılında ilk kez üretilen AFM, hassas bir iğnenin ucuyla taranan yüzeyin topografisini ölçmeye olanak sağlar ve atomik bir ölçekte yalıtkanlar ve iletkenler incelenebilir [55]. AFM iyi mekânsal çözünürlüğü ile mekanik, elektriksel, magnetik ve diğer özellikleri ile bir malzemenin yüzey özelliklerini geniş bir yelpazede hızlı bir şekilde incelemeye olanak verir [56]. AFM'nin nasıl çalıştığı Şekil 3.7'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik diyagramı.

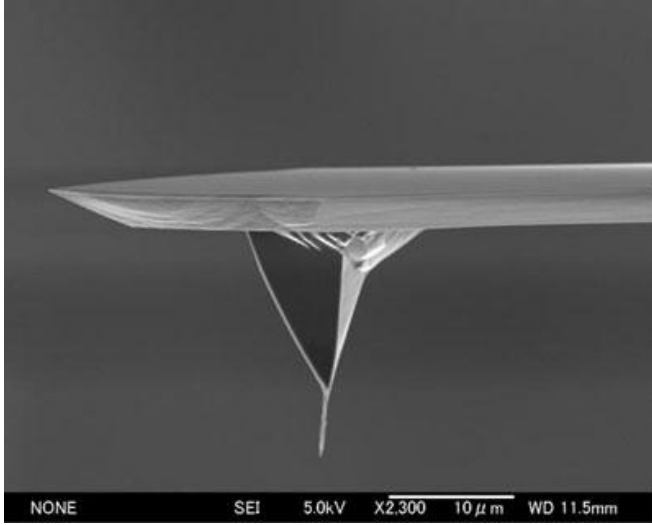
Bir piezo tüp numuneyi konsolun ucunda taşınan hassas iğnenin altına getirir ve numune burada sabitlenir. Konsolun ucundaki hassas iğne numune yüzeyine yaklaştığında iğne ve numune yüzeyi arasındaki kuvvet ölçülür. İğne, yüzeyi

istenilen x ya da y yöneliminde tarayarak numunenin yüzey görüntüsünü oluşturur. Konsolun deformasyonları, bir fotoelektrik diyot sistemi sayesinde yansımış bir lazer demetinden ışık spotunun yer değiştirmesi ölçülerek belirlenir. AFM'nin uygulama modlarına bağlı olarak farklı karakteristiklere sahip konsollar kullanılır [56].



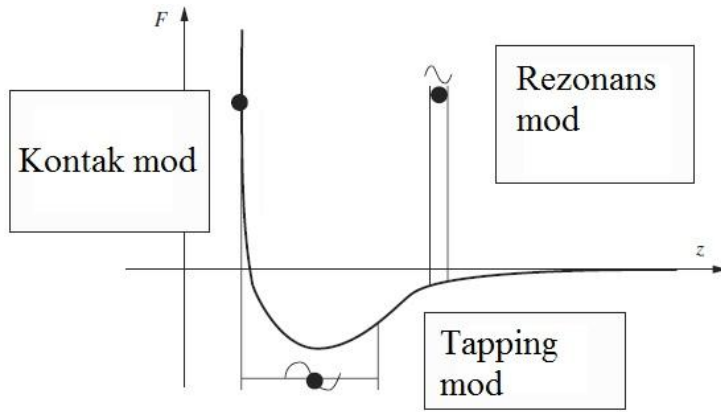
Resim 3.5. Veeco di CP-II multi mode AFM sistemi.

Grafen numuneleri için AFM ölçümleri Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesindeki Veeco CP-II multi mode AFM sisteminde (Resim 3.5) alınmıştır.



Şekil 3.8. Bir atomik kuvvet mikroskobu iğnesi.

Bazı AFM modları şunlardır: Kontak mod, rezonans mod ve tapping (hafif dokunma) mod. AFM iğnesi ve numune yüzey atomları arasındaki etkileşme Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. AFM işlem modları iğne ve numune arasındaki etkileşme kuvvetini gösteren bu diyagramda siyah noktalarla gösterilmiştir. Tapping ve rezonans modlarda konsol titreşimleri rezonans frekansına yakın, fakat kontak modda sanki (quasi)-statiktir.

i. Kontak mod

AFM'nin ilk biçimi, bu mod potansiyelin itici kenarına yakın çalışır. Bu nedenle ucun numune yüzeyine temas ettiği söylenilebilir. Ancak bazı numunelerdeki,

aşınma, yıpranma ve deformasyonlar görüntü kalitesini bozan iğneden kaynaklanır. Bu mod, hızlı ve kullanımı kolaydır.

ii. Rezonans mod

Lineer rezonans modu olarak tarif edilebilir, bu çalışma modunda konsol, yüzeyden uzağa ve küçük genliklerle rezonans frekansında salınım yapar. Burdaki uzak ve küçük terimleri görecelidir. Etkileşme kuvvetinin değişmesi konsolun rezonans frekansını kaydırır. İğnenin salınımları yüzeyden oldukça uzaktır. Bu nedenle, bu mod topografik çalışmalar için genellikle kullanılmaz. Ancak iletken ya da manyetik uçlar kullanılarak sırasıyla uzun-menzilli elektrik ya da manyetik kuvvetler analiz edilebilir.

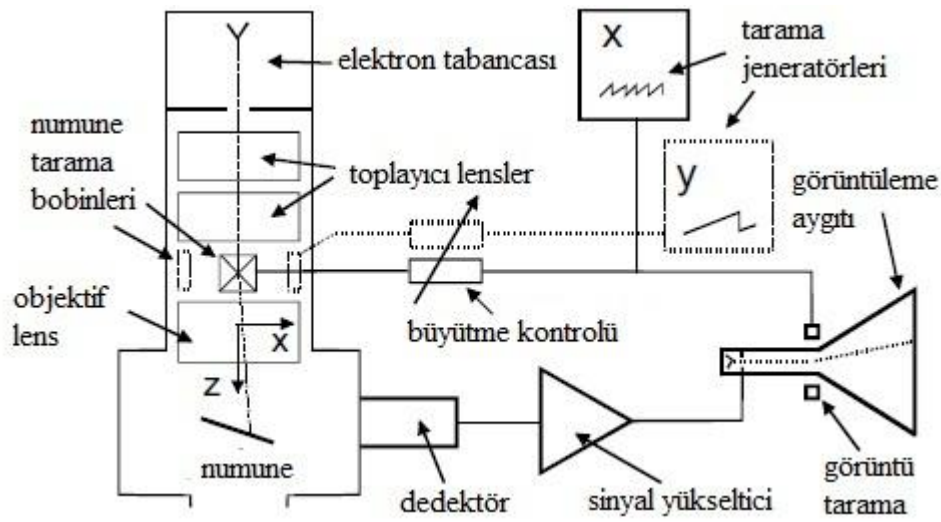
iii. Tapping mod

Temassızlık modu olarak da bilinen bu mod, lineer olmayan bir rezonans modudur. Salınım genlikleri daha büyük ve ucun ortalama konumu yüzeye daha yakındır. Her döngüde iğnenin yüzeyin itici duvarına hafifçe değdiği söylenilebilir. Bu çalışma modunda numunenin yüzey topografyasını analiz etmek daha zordur. Numune yüzeylerine uygulanan kuvvetler çok küçük ve kontak zamanı kısa (neredeyse sürtünme kuvveti oluşmuyor) olabilir. Taping mod atomik çözünürlük sağlamaz fakat pürüzlülüğü fazla olan yüzeylerin görüntüsünü oluşturmak için avantajlıdır.

3.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenlerin yüzey özelliklerini incelemek ve litografi işlemi yapmak için taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu ile bir malzemenin kirlilik, kimyasal bileşen ve topografyası analiz edilebilir. Topografi bilgisi ile bir malzemenin yapısı ve sertliği gibi yüzey özellikleri SEM ile incelenebilir [57]. Bir SEM ile yüksek gerilimle hızlandırılmış elektronlar hedef numune üzerine odaklanır ve bu yüksek enerjili elektron demetine numunenin yüzeyi taratılırsa, elektronlar ve yüzey atomları arasında oluşan

etkileşmeler uygun algılayıcılar ile toplanır ve algılayıcılardan gelen bu sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar ekranına aktarılır. Ayrım gücü, odak derinliği, görüntü ve analizi birleştirme özelliği nedeniyle taramalı elektron mikroskopunun kullanım alanı çok geniştir. SEM'in yapısı Şekil. 3.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Bir CRT (katot ışınları tüpü) ekran ile bir taramalı elektron mikroskopunun şematik görüntüsü.

Bir SEM'in bileşenleri şunlardır: Elektron kaynağı (tabancası), elektron lensleri, numune ortamı, ilgili sinyaller için dedektör, ekran/veri çıkış aygıtları. Alt yapı gereksinimleri ise şunlardır: Güç kaynağı, vakum sistemi, soğutma sistemi, titreşimsiz zemin, manyetik ve elektrik alanların serbest olduğu oda. SEM'ler her zaman en az bir dedektöre (genellikle ikincil elektron dedektörü) gerek duyar ve ilave birçok dedektöre sahiptirler. SEM'ler genel olarak nitel kimyasal analiz ve/veya kristal yapısına dayalı aşamaları belirlemek için kullanılmıştır. SEM ile 50 nm boyutunda çok küçük bir nesnenin ölçümü rahatlıkla alınabilir [58]. Ayrıca SEM'ler kırınımına uğramış geri saçılmalı elektron dedektörü donanımı ile mikro fabrikasyon ve kristalografik yönelimi incelemek için kullanılabilir. SEM görüntüsü alınacak olan numunelerin katı olması ve mikroskop odasının içine sığması gerekir. Ölçümü alınacak olan numunenin boyutları; yatayda genellikle maksimum 10 cm'yi bulur, dikeyde ise boyutları çok sınırlıdır (40 mm'yi nadiren aşar). Numuneler yaklaşık 10^{-5}

- 10^{-6} torr vakum içinde sabit olmalıdır. SEM'ler 5 nm çözünürlükte, 15X'den 200000X'e kadar değişen bir büyütme oranına sahiptir [57]. Modern bir SEM, TEM kadar iyi olmasada genellikle 1 nm ve 10 nm arasında bir çözünürlükte görüntü sağlayabilir [58].

3.6. Grafenin Elektriksel Karakterizasyonu

3.6.1. Hall etkisi ölçüm sistemi

Bu tez çalışmasında kullanılan numunelerin sıcaklığa bağlı Hall etkisi ölçümleri Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Lake Shore otomatik Hall etkisi ölçüm sisteminde alınmıştır. Lake Shore otomatik Hall etkisi ölçüm sistemi Resim 3.6'da gösterilmiştir.

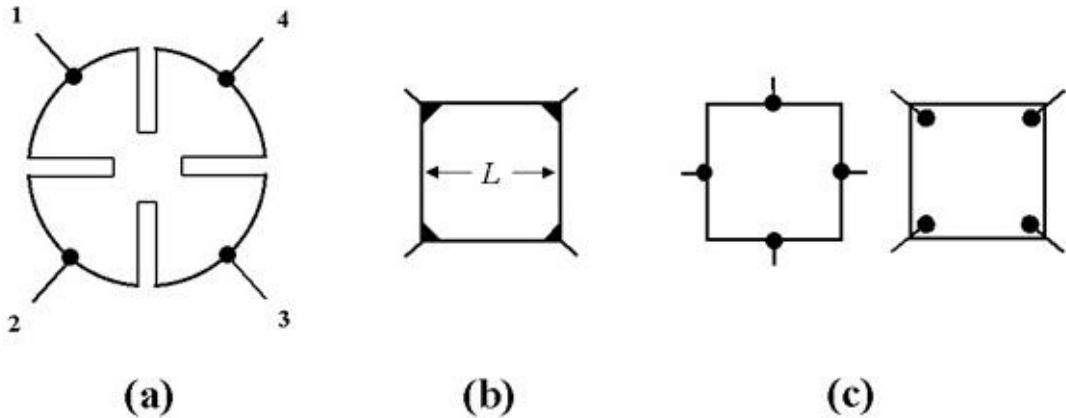


Resim 3.6. Lake Shore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi.

Lake Shore 7700 serisi yüksek empedans Hall etkisi ölçüm sistemi ile 15-350 K sıcaklık aralığında ölçüm alınabilir. Bu Hall etkisi sisteminin manyetik alan aralığı 0-1,5 Tesla'dır. Sistem kapalı devre helyum soğutması ile soğutularak 15-350 K sıcaklık aralığında ölçüm almayı mümkün kılmıştır. Hall direnci, Hall hareketliliği ve taşıyıcı yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak elde edilmiştir.

3.6.2. Özdirenç ölçümleri

Bu tez çalışmasında kullanılan epitaksiyel grafen numuneleri için van der Pauw tekniği kullanılarak sıcaklığa bağlı klasik Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Van der Pauw tekniği numunenin dört köşesine kontak alınarak gerçekleştirilir.



Şekil 3.11. Çeşitli van der Pauw geometrileri. (a) Yonca yaprağı biçiminde van der Pauw yapısı (tercih edilir). (b) Kare van der Pauw yapısı (tercih edilir). (c) Kontaktları kenarların dışında olan kare van der Pauw yapıları (tercih edilmiyor).

Şekil 3.11'da gösterilen van der Pauw geometrileri kullanılarak Hall etkisi ölçümleri almak mümkündür. Bu yapılar için özdirenç Eş. 3.2 ile verilir [59]:

$$\rho = \frac{\pi l}{\ln 2} \left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right] f \left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} \right) \quad (3.2)$$

Eş. 3.2’de d numunenin kalınlığı. Şekil 3.11 dikkate alınara; $R_{12,34}$ 1 ve 2 kontakları arasındaki akımın, 3 ve 4 kontakları arasında oluşturduğu potansiyel farkını verir.

$$f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) = 1 - \left(\frac{R_{12,34} - R_{23,41}}{R_{12,34} + R_{23,41}}\right)^2 \frac{\ln 2}{2} - \left(\frac{R_{12,34} - R_{23,41}}{R_{12,34} + R_{23,41}}\right)^4 \left(\frac{\ln^2 2}{4} - \frac{\ln^3 2}{12}\right) \quad (3.3)$$

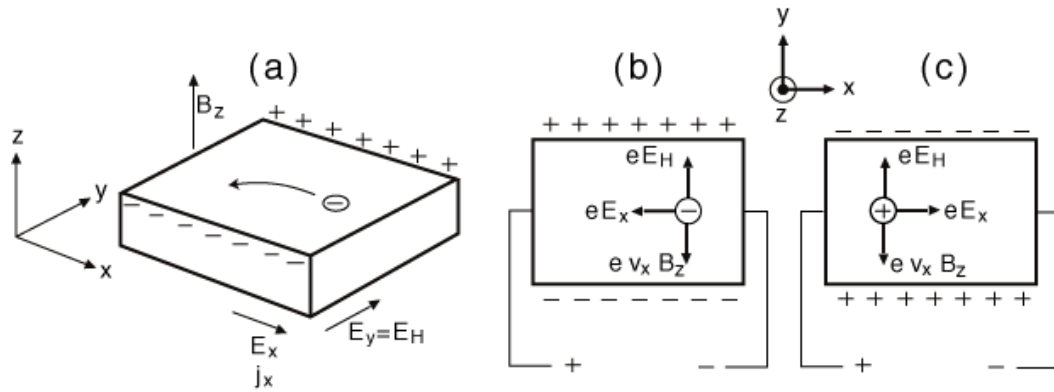
Düzeltilme faktörü $f(R_{12,34}/R_{23,41})$ Eş. 3.3’deki gibi verilir. 8 farklı durum için öz direnç ölçümü yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

3.6.3. Hall etkisi ölçümleri

Hall etkisi Şekil 3.12’de şematik olarak gösterilmiştir. Hall etkisi, bir malzemenin içinden geçen elektrik akımına dik bir manyetik alan uyulduğunda meydana gelir. Hall etkisi ölçümleri de öz direnç ölçümlerine benzer olarak van der Pauw yöntemiyle alınır. Hall katsayısı Eş. 3.4 ile verilir:

$$R_H = \frac{\Delta R_{13,24} d}{B} \quad (3.4)$$

Numuneye uygulanan dış $\vec{B}$ manyetik alanının $R_{13,24}$ değerinde meydana getirdiği değişimler $\Delta R_{13,24}$ ile gösterilmiştir. Hall katsayısı numunenin taşıyıcı tipinin belirlenmesine olanak sağlar. Bu tezde kullanılan van der Pauw geometrisindeki epitaksiyel grafen numunelerinde geçit kontağı olmadığı için taşıyıcı tipini kontrol etmemiz mümkün değildir. Dirac noktasının konumuna göre taşıyıcılar n ya da p tipidir. Grafen PMMA kalıntıların ya da suyun (H_2O) soğurulduğu durumlar için genelde p tipi davranış göstermektedir [60]. Uygulanan dış manyetik alan ile grafen numunesinin Dirac noktasında da değişimler gözlenir [61]. Bu nedenle taşıyıcı tipi geçit gerilimi uygulanmadan bilinemez. Dirac noktası bilinen bir numunenin taşıyıcı tipini bilmek çok kolaydır ve sadece gerilimle oynayarak taşıyıcı yoğunluğu ve türü belirlenebilir [61].



Şekil 3.12. (a) Klasik Hall etkisinin şematik gösterimi. (b) Numune içindeki bir elektronun uygulanan dış manyetik alan ve elektrik alanla hareketinin yönelimi. (c) Numune içindeki bir elektronun uygulanan dış manyetik alan ve elektrik alanla hareketinin yönelimi.

Özdirenç ölçümlerinden elde edilen Eş. 3.4 ve Hall katsayısı kullanılarak Hall hareketliliği ve Hall taşıyıcı yoğunluğu belirlenebilir. μ_H ve n_H sırasıyla Eş.3.5 ve Eş. 3.6 ile verilir;

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (3.5)$$

$$n_H = \frac{1}{eR_H} \quad (3.6)$$

Verilen bu eşitlikler sayesinde bir numunenin van der Pauw tekniği ile öz direnini, taşıyıcı yoğunluğunu ve mobilitesini belirleyebiliriz.

3.6.4. Manyetoiletim

Bir malzemeye dışardan uygulanan bir manyetik alan ile malzemenin elektriksel öz direncinin değişmesi manyetoöz direnç olarak tanımlanır. Klasik bir yarıiletken içindeki yüklü taşıyıcıların manyetik ve elektrik alan altında hareket denklemini çözebilmek için öncelikle Lorentz kuvveti yazılır ve daha sonra manyetoöz direnç eşitlikleri çıkartılır.

$$m^* \frac{dv}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - m^* \frac{v}{T} \quad (3.7)$$

Eş. 3.7'deki $-e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}$ terimi Lorentz kuvvetidir. $\vec{v}$ taşıyıcıların hızıdır. $\vec{B}$ uygulanan manyetik alan. $\vec{E}$ uygulanan elektrik alanıdır.

$$v_x = -\frac{e\tau}{m^*} \frac{1}{1 + w_c^2 \tau^2} (E_x - w_c \tau E_y) \quad (3.8)$$

$$v_y = -\frac{e\tau}{m^*} \frac{1}{1 + w_c^2 \tau^2} (w_c \tau E_x + E_y) \quad (3.9)$$

Bu denklemlerde görülen w_c siklotron frekansıdır. Magneto-iletkenlik tensörü $\vec{\sigma}(B)$, elektrik alana bağlı akım yoğunluğu ile ilişkilidir.

$$\vec{J} = \vec{\sigma} \vec{E} \quad (3.10)$$

Magnetoiletkenlik tensörü Eş. 3.11 ile verilir:

$$\vec{\sigma}(B) = \frac{ne^2\tau}{m^*} \frac{1}{1 + w_c^2 \tau^2} \begin{pmatrix} 1 & -w_c \tau \\ w_c \tau & 1 \end{pmatrix} = \frac{\mu ne}{1 + \mu^2 B^2} \begin{pmatrix} 1 & -\mu B \\ \mu B & 1 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Burada, τ saçılma zamanının etkin kütleye m^* oranı, taşıyıcı hareketliliği açısından ifade edebilmek için kullanılmıştır. Magneto-özdirenç tensörü $\vec{\rho}(B)$ iletkenlik

tensörünün tersidir. Böylece bu modelde boyuna direncin $\rho_{xx} = \frac{1}{ne\mu}$ uygulanan

manyetik alandan bağımsız olduğu belirlenir. Ancak $\rho_{xy} = -\frac{B}{ne}$ Hall direncini,

taşıyıcı yoğunluğu ve yük taşıyıcılarının tipi belirler. Hall direnci, saçılma zamanı ve

etkin kütleden bağımsızdır. Bu bilgiden yararlanarak Eş. 3.10'u aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \vec{E} = \vec{\rho} \vec{J} = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & -\rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_x \\ j_y \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Burada $\rho_{xy} = -\rho_{yx}$ ve $\rho_{yy} = -\rho_{xx}$ olarak kullanılmıştır.

$$\rho_{xx} = \frac{E_x}{J_x} = \frac{W}{L} \frac{V_X}{I} = \frac{W}{L} R_{xx} \quad (3.13)$$

$$\rho_{yx} = \frac{E_y}{J_x} = \frac{V_y}{I} = R_{xy} \quad (3.14)$$

Burada, enine öz direncin numune geometrisinden bağımsız olduğu ve dirence eşit olduğu gösterilmiştir. W numunenin genişliği, L ise gerilim uçları arasındaki mesafedir. Boyuna öz direnç ise numunenin genişlik ve uzunluk oranlarına bağlıdır. Bu öz direnç değerlerine karşılık gelen iletkenlikler ters öz direnç tensörleri ile aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\sigma_{xx} = \frac{\rho_{xx}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\rho_{xy}}{\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2} \quad (3.16)$$

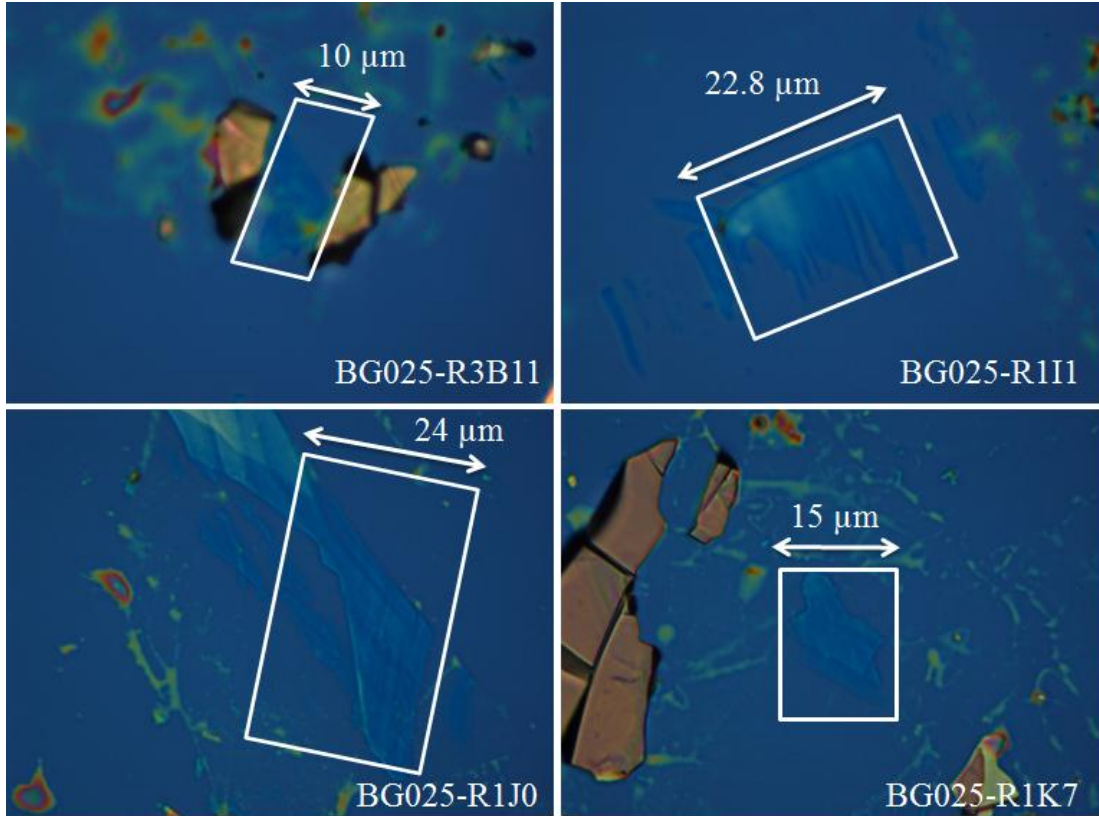
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Optik Mikroskop ile Grafen Tabakalarının Belirlenmesi

Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafen tabakalarının belirlenmesi için optik mikroskop kullanılmıştır. SiO₂ yüzeyi üzerindeki koordinatlar yardımıyla optik mikroskop altında belirlenen grafen tabakalarının konumları kaydedilmiştir. Grafit soyma yöntemi iki ayrı işlem olarak ele alındı ve elde edilen grafen tabakalarının kalitesi optik mikroskop altında belirlendi. Grafen üretim yöntemleri önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu bölümde, bahsedilen yöntemlerle elde edilmiş grafenlerin optik mikroskop görüntüleri incelenecektir.

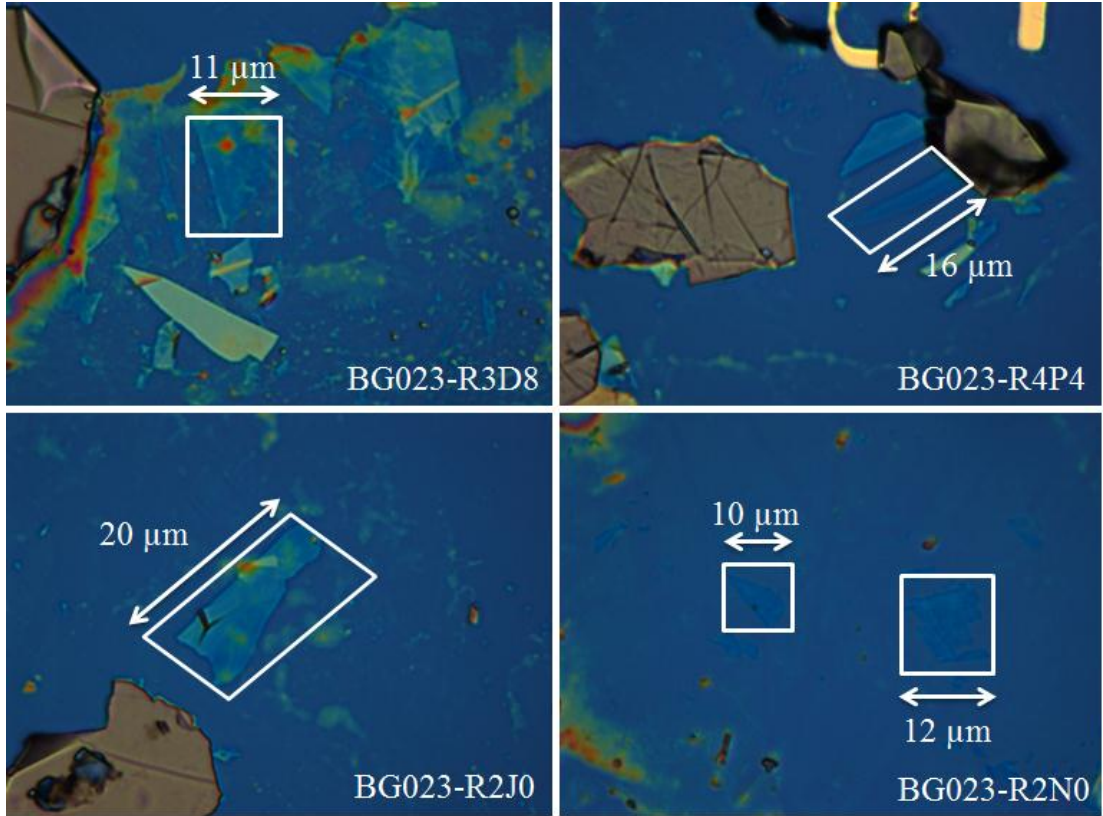
i. DC-gerilim işlemi

Bu yöntemde, bandın HOPG parçalarının yayılmış olduğu yüzey ve *n*-tipi iletken Si alttaş arasındaki elektrik alan, Si alttaş ve HOPG arasında çekici bir elektrostatik kuvvet oluşturur ve bu sayede HOPG yüzeyindeki grafen parçalarının koparak SiO₂ yüzeyine yapışması sağlanır [40]. Sırasıyla $3,3 \times 10^7$ V/m, $6,7 \times 10^7$ V/m ve 10×10^7 V/m elektrik alan uygulandıktan sonra optik mikroskop altında grafen tabakalarının yerleri belirlendi ve incelendi.



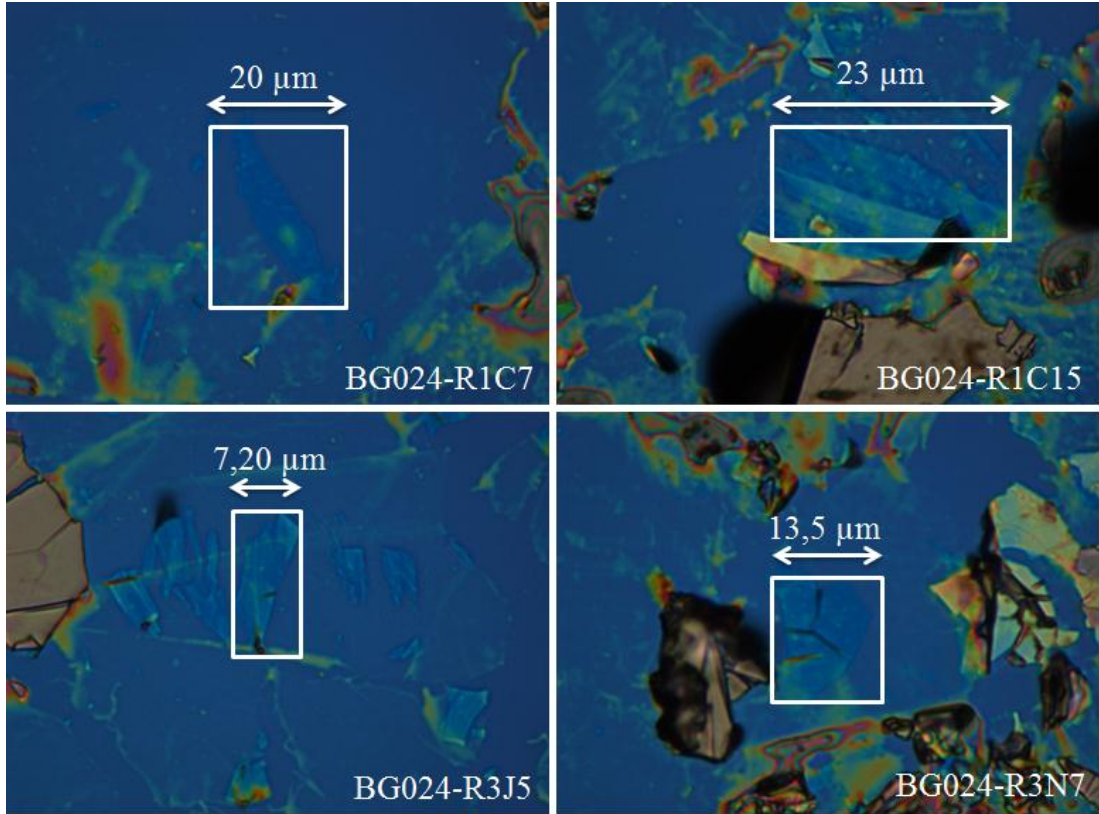
Şekil 4.1. 3.3×10^7 V/m elektrik alan altında SiO_2/Si alttaş üzerinde oluşan grafitik yapılar.

Şekil 4.1’de 3.3×10^7 V/m elektrik alan altında SiO_2/Si alttaş üzerinde oluşan grafitik yapılar görülmektedir. Buradaki grafitik parçaların çeşitli boyutlarda ve kalınlıklarda olduğu görülmektedir. İki grafit parçası arasındaki BG025-R3B11 örneği diğerlerinden daha küçük olsada SiO_2 yüzeyi ile arasında çok fazla kontrast farkı olmadığı için diğerlerinden daha ince olduğu söylenebilir. Ayrıca yüzeyde çok büyük grafit parçalarının olması litografi işlemini zorlaştıracak için istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4.2. $6,7 \times 10^7$ V/m elektrik alan altında SiO_2/Si alttaş üzerinde oluşan grafitik yapılar.

Şekil 4.2’de uygulanan $6,7 \times 10^7$ V/m elektrik alan ile SiO_2/Si yüzeyi üzerinde çok daha fazla grafit parçasının biriktiği ve $3,3 \times 10^7$ V/m elektrik alan uygulandıktan sonraki durumdan daha küçük boyutlarda grafitik yapıların oluştuğu görülmektedir.

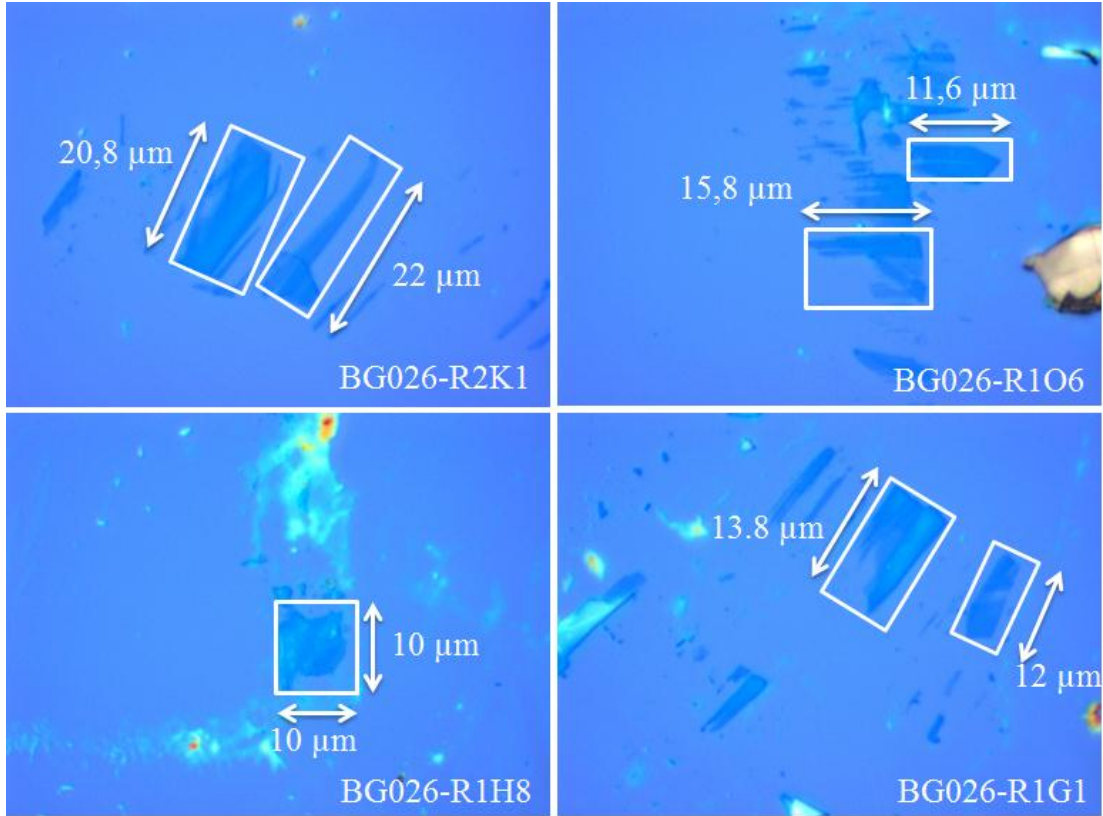


Şekil 4.3. 10×10^7 V/m elektrik alan altında SiO_2/Si alttaş üzerinde oluşan grafitik yapılar.

Şekil 4.3’de uygulanan 10×10^7 V/m elektrik alan ile SiO_2/Si yüzeyi üzerinde çok fazla grafit parçasının biriktiği, yüzeyin çok kirli olduğu ve grafitik yapıların kalitesinin çok düşük olduğu görülmektedir. $3,3 \times 10^7$ V/m elektrik alan altında diğer elektrik alanlara göre daha iyi sonuç alınmıştır.

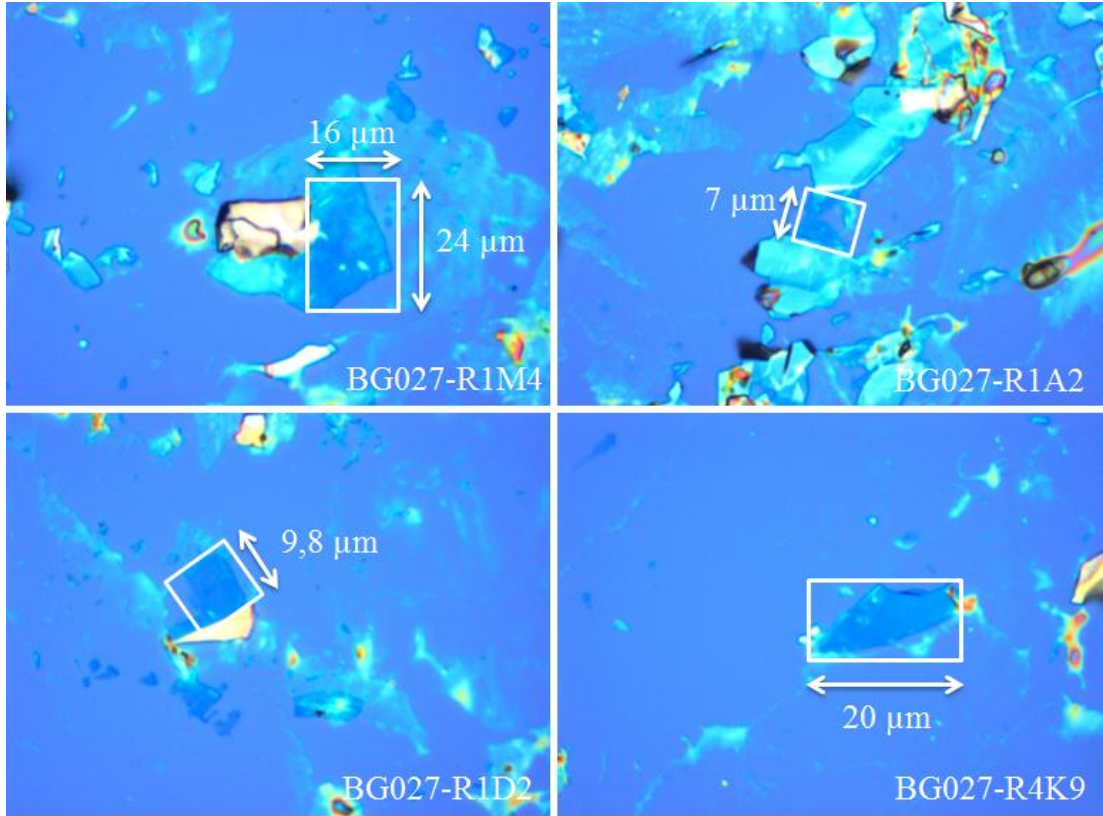
ii. Isıl İşlem

Yüzeyine HOPG parçaları dağıtılmış olan bir bant, 200°C sıcaklıktaki bir fırın üzerinde sırasıyla 5, 10 ve 15 saniye ısıtılan farklı SiO_2/Si alttaşlar üzerine yapıştırıldı ve optik mikroskop altında grafitik yapılar incelendi.



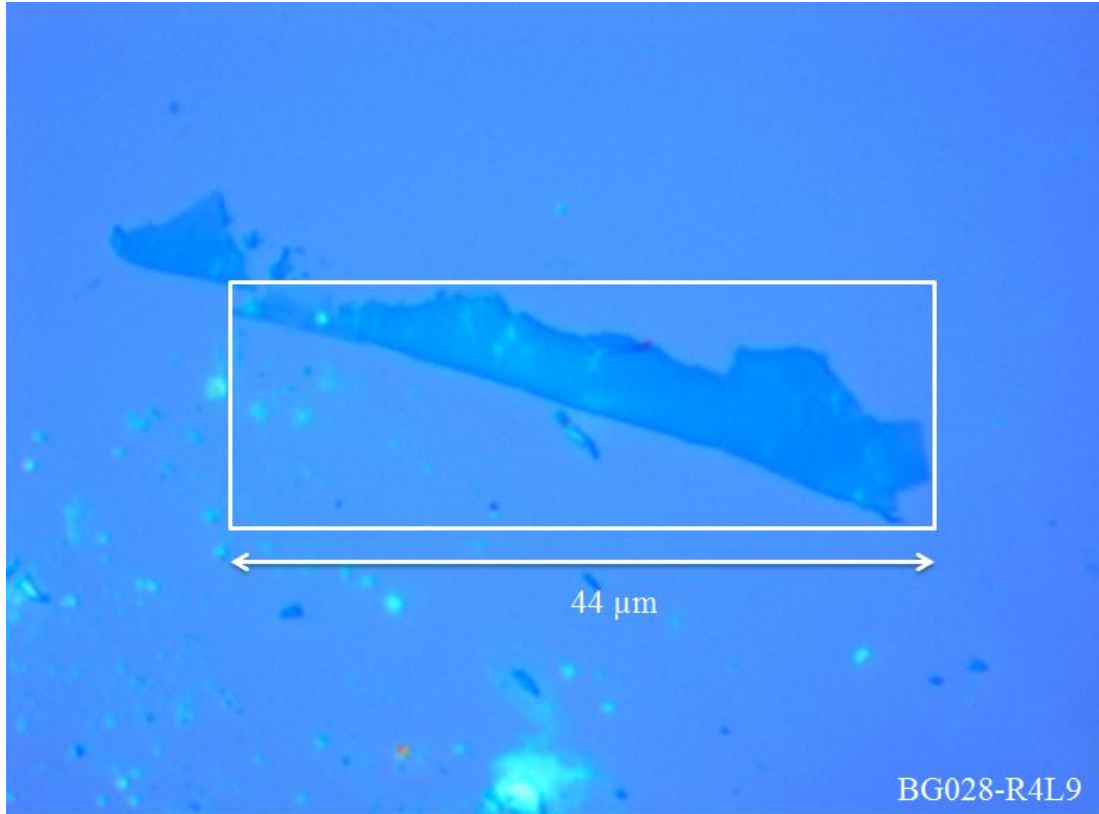
Şekil 4.4. SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 5 saniye ısıtıldı.

Şekil 4.4’de SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 5 saniye ısıtıldıktan sonra alınan optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Optik mikroskop altında yüzey incelendiğinde, DC-gerilim işlemine göre yüzeyin daha temiz ve elde edilen grafitik parçaların daha kaliteli olduğu görülmüştür. SiO₂/Si alttaş yüzeyinde grafit parçaları daha az görülmektedir fakat bant kalıntılarındaki bir azalma olmamıştır. BG026-R2K1 örneğinin diğer grafitik yapılara göre daha uzun ve etrafının daha temiz olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 10 saniye ısıtıldı.

Şekil 4.5’de SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 10 saniye ısıtıldıktan sonra alınan optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Alttaş 5 saniye ısıtıldıktan sonra alınan görüntülerle karşılaştırıldığında yüzeyin daha kirli, elde edilen grafitik yapıların daha küçük boyutlarda olduğu görülmüştür. Yüzeydeki yoğun bant ve grafit parçaları litografi sırasında zorluk çıkaracağı için bu örnekler litografi için uygun değildir.



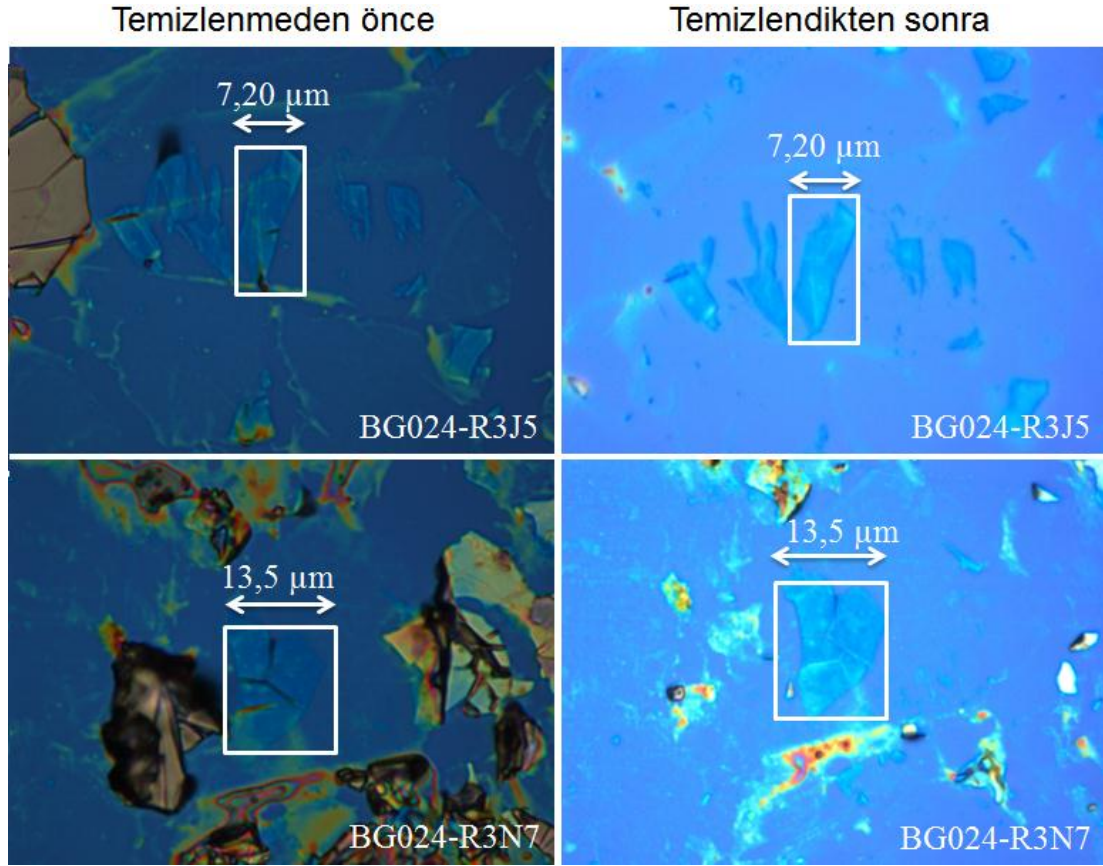
Şekil 4.6. SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 20 saniye ısıtıldı.

Şekil 4.6’da SiO₂/Si alttaş 200 °C’de 20 saniye ısıtıldıktan sonra alınan optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Bu işlem sırasında SiO₂/Si alttaş yüzeyinde sadece bir grafitik yapı gözlemlendi. Boyut olarak daha önce elde edilen grafitik yapılardan çok daha büyük ve kalın olduğu görülmektedir fakat 20 saniye sonunda diğer sürelerle göre daha az grafitik yapı elde edildiği için en uygun sürenin 5 saniye olduğu söylenebilir.

4.2. SiO₂/Si Alttaş Yüzeyinin Temizlenmesi

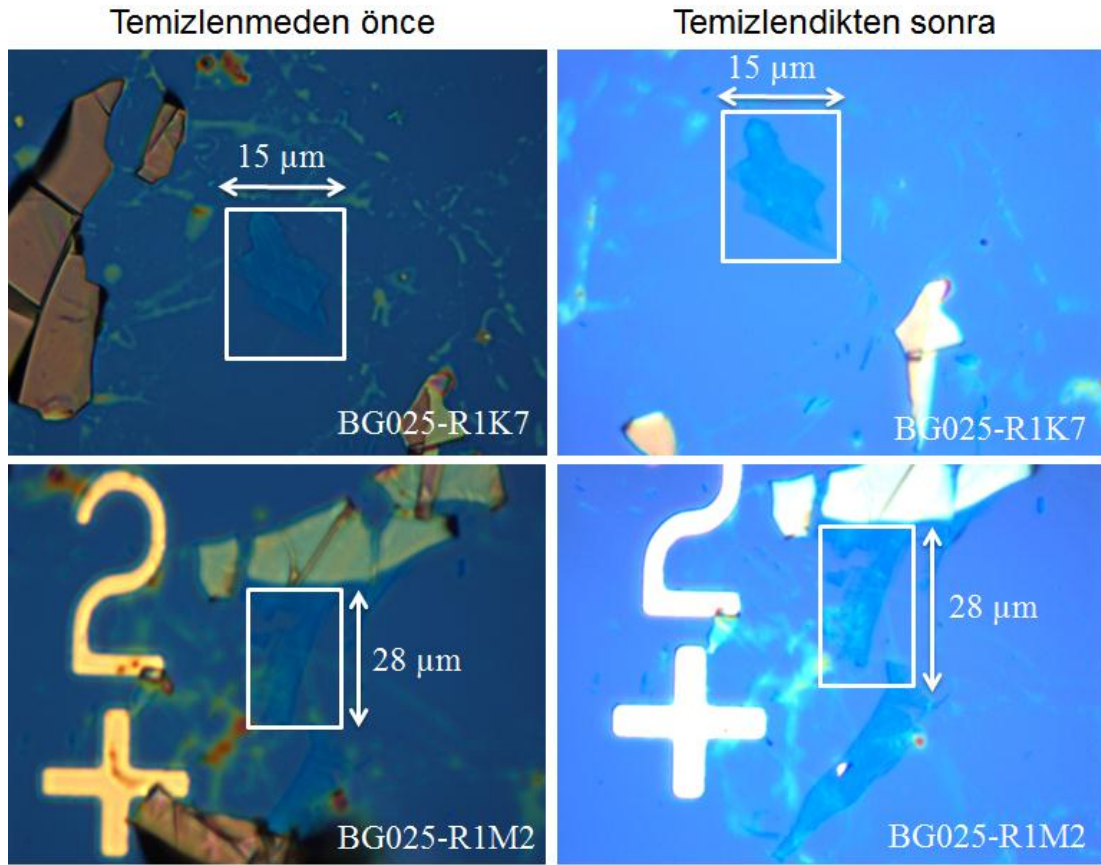
Önceki alt bölümdeki optik mikroskop görüntülerinde, SiO₂/Si alttaş yüzeyi üzerinde grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafitik yapıların çevresinin grafit ve bant kalıntılarıyla kirlenmiş olduğu görülmüştü. Bu kalıntıları temizlemek amacıyla, DC-gerilim ve ısı işlem uygulanan SiO₂/Si alttaşlar, ultrasonik temizleyici cihazında, izopropil alkol içinde 3 dakika titreştirilerek yüzeydeki büyük grafit parçalarının ve

bant kalıntılarının temizlenmesi sağlandı. Temizleme işleminden sonra optik mikroskop ile SiO_2/Si alttaş yüzeyi tekrar incelendi.



Şekil 4.7. BG024 numunesinin temizlenmeden önceki ve temizlendikten sonraki optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.7’de BG024 numunesinin temizleme işleminden sonraki optik mikroskop görüntüleri, ilk optik mikroskop görüntüleriyle karşılaştırıldığında, temizleme işleminden sonra yüzeydeki büyük grafit parçalarının ve bant kalıntılarının büyük bir kısmının yüzeyden ayrıldığı görülmektedir.

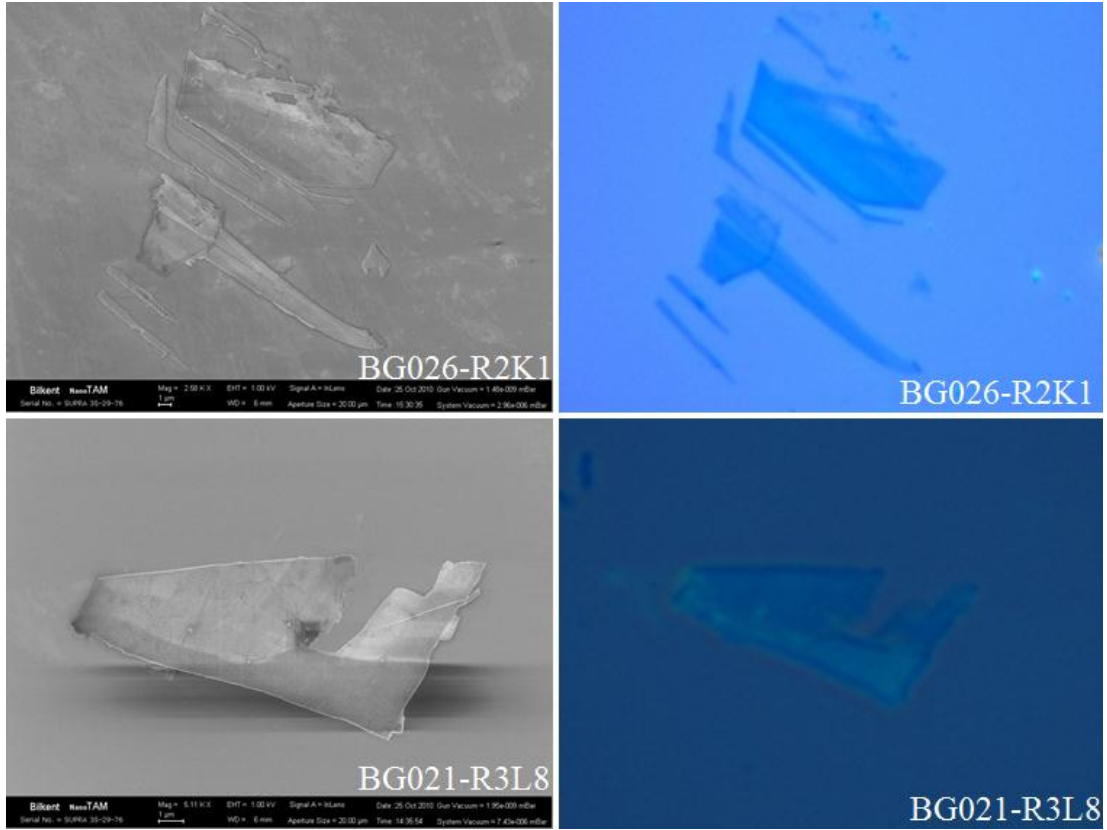


Şekil 4.8. BG025 numunesinin temizlenmeden önceki ve temizlendikten sonraki optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.8’de BG024 numunesinde olduğu gibi, BG025 numunesinin yüzeyindeki büyük grafit ve bant kalıntılarının temizleme işleminden sonra yüzeyden ayrıldığı görülmektedir. Temizleme işlemi ile sadece büyük grafit parçaları ve bant kalıntıları yüzeyden ayrılmıştır. İnce grafitik yapılarda herhangi bir değişme meydana gelmemiştir.

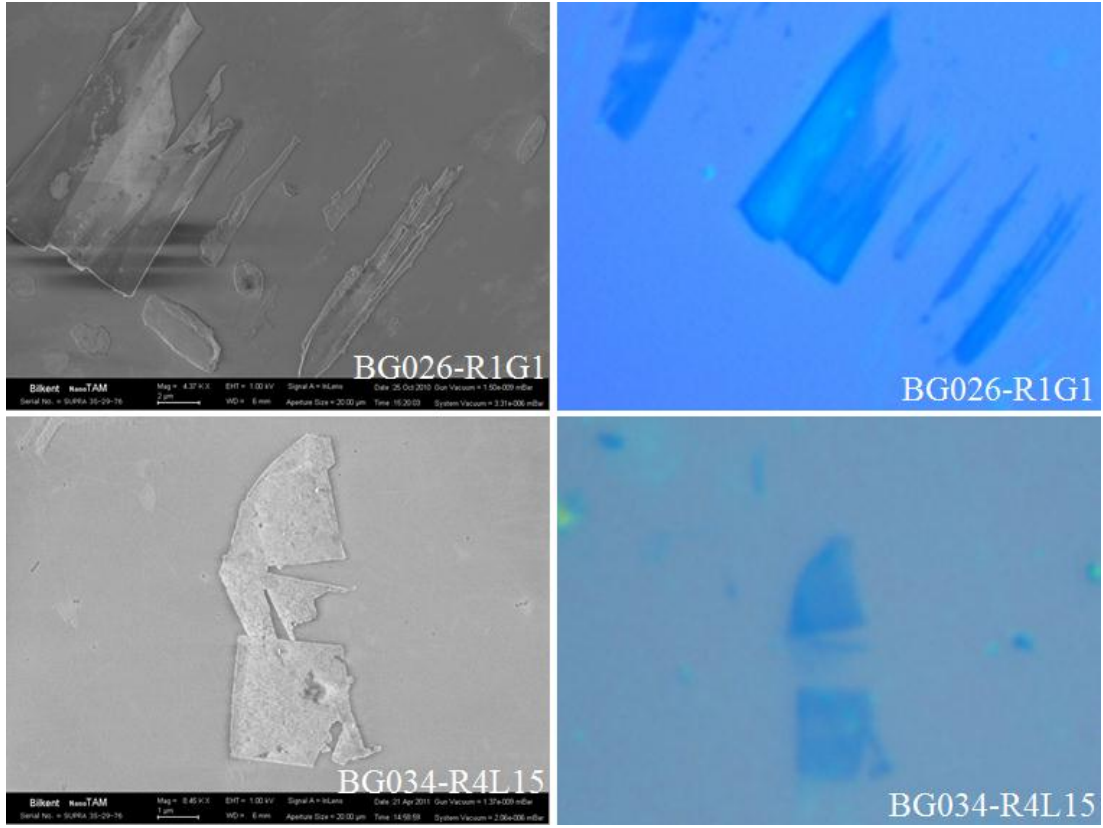
4.3. SEM Ölçümleri

Grafit soyma işlemi ile elde edilen grafitik yapılar optik mikroskop altında incelendikten sonra SEM ile tekrar incelendi. SEM görüntüleri 1 kV gerilim altında alındı. Daha yüksek gerilimlerde elektronların enerjisi de artacağından grafenlerin zarar görmesine neden olacaktır. Bu nedenle görüntüler 1 kV’da alındı.



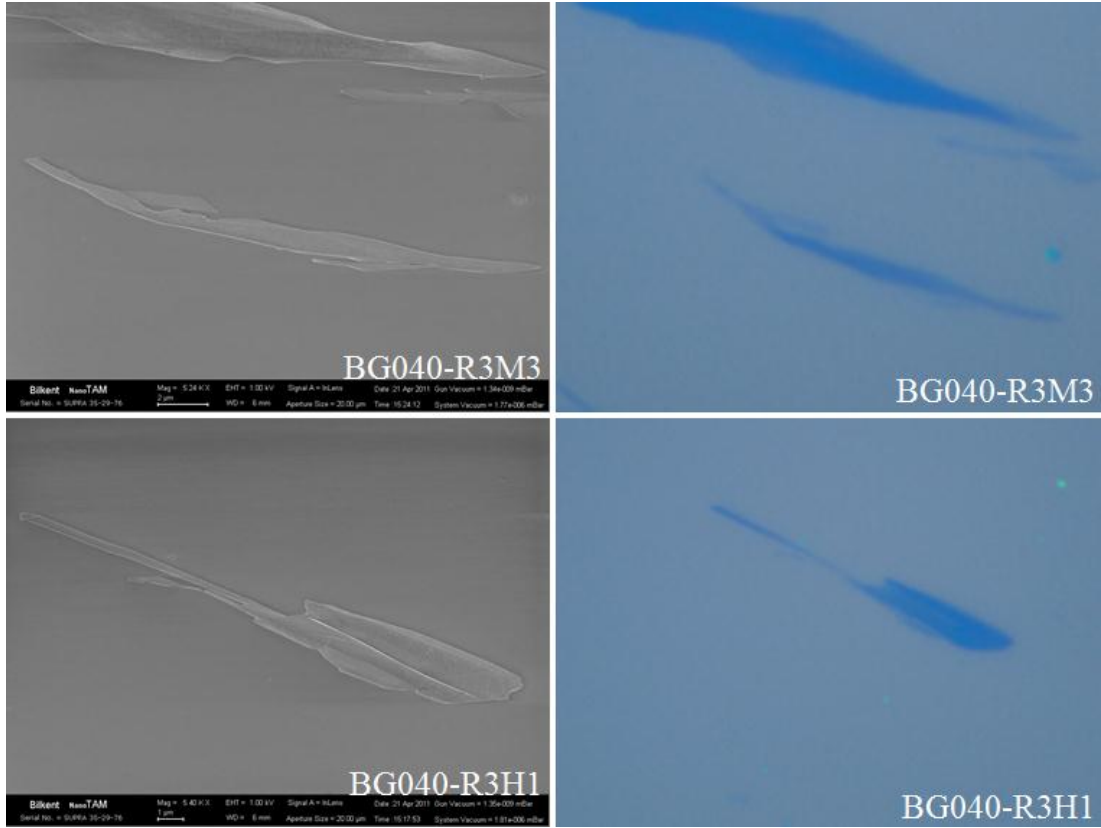
Şekil 4.9. BG026-R2K1 ve BG021-R3L8 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.9’da grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafitik yapıların SEM ve optik mikroskop görüntüleri karşılaştırılmıştır. SEM ölçümlerinde grafitik yapılar daha net olarak görülebilmektedir. Optik mikroskop ile incelendiğinde farkedilmeyen çok ince tabakalar SEM ile kolaylıkla belirlenebilmektedir.



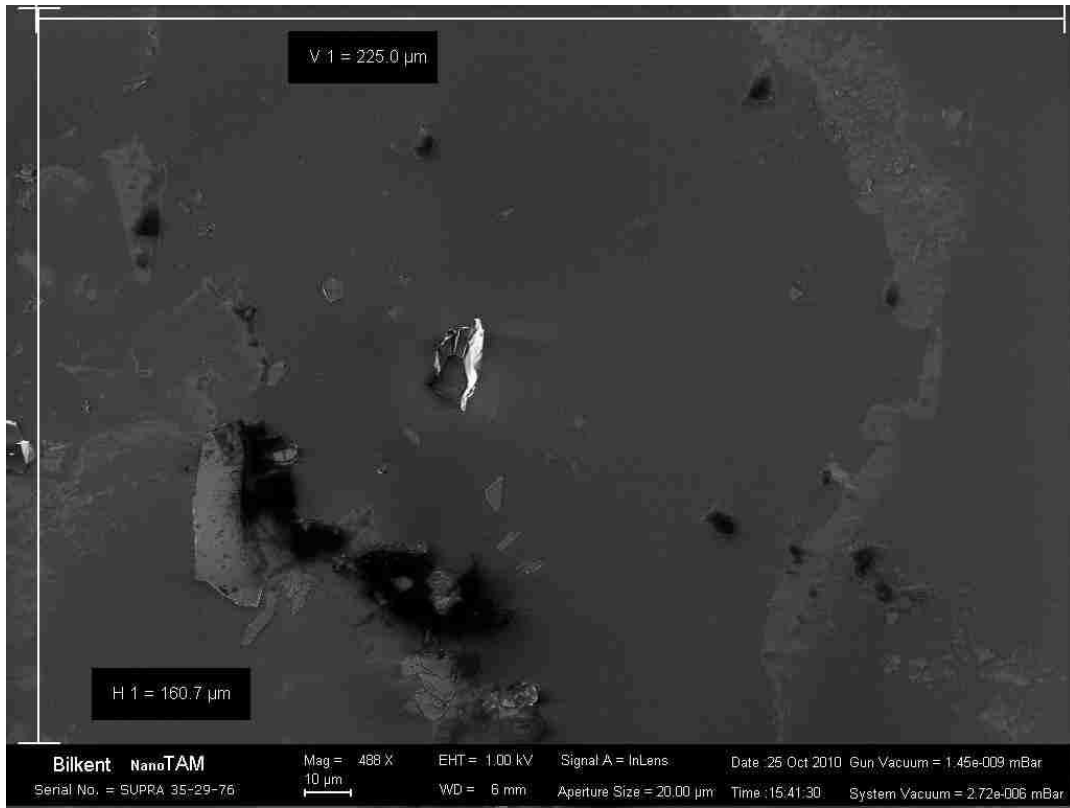
Şekil 4.10. BG026-R1G1 ve BG021-R4L15 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.10'da BG026-R1G1 ve BG021-R4L15 numuneleri için SEM ve optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Bu şekilde de SEM kullanılarak alınan görüntülerin grafitik yapıları daha net gösterdiği görülmektedir. Optik mikroskop altında seçilemeyen çok ince grafen bölgeleri (BG034-R4L15 numunesinin orta bölgesi) SEM kullanılarak incelendiğinde çok net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 4.11. BG040-R3M3 ve BG021-R3H1 numunelerinin solda; SEM görüntüleri, sağda; optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.11’de BG040-R3M3 ve BG021-R3H1 numuneleri için SEM ve optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Benzer biçimde bu numunelerde de optik mikroskop altında seçilemeyen ince grafitik yapıların SEM kullanılarak net bir şekilde gözlemlendiği görülmektedir. BG021-R3H1 numunesi optik mikroskopta ince kısmı bağlantısız gibi görülmekte iken SEM ile incelendiğinde durum daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 4.12. SiO₂/Si alttaşın SEM görüntüsü.

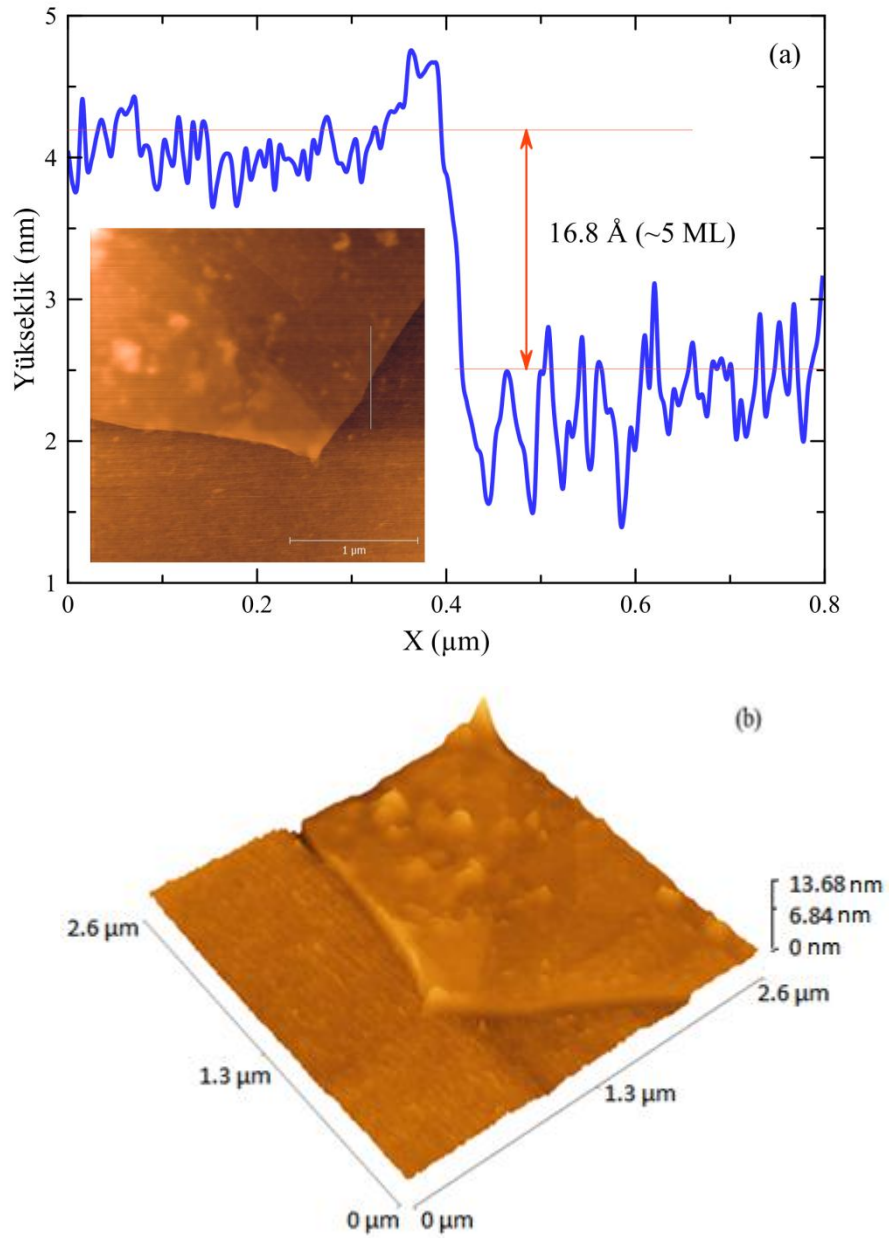
Şekil 4.12’de SiO₂ yüzeyinin SEM görüntüsü gösterilmiştir. Burada daha önce üzerinde grafitik yapılar elde edilmeye çalışılmış bir SiO₂/Si alttaşın yüzeyi görülmektedir. Yüzeyin çok düz olmadığı, girinti ve çıkıntıların varlığı görülmektedir [62]. Bu nedenle SiO₂ yüzeyinin farklı bölgelerinde farklı oranlarda grafitik yapılar elde edilmektedir. Ayrıca, SiO₂ yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar nedeniyle askıda grafen elde etmekte mümkündür. Bu sayede yüksek hareketlilikli grafen aygıtlar elde edilebilir [63-64].

4.4. AFM Ölçümleri

Grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilen grafen numunelerinin yüzeyleri AFM ile incelendi. Her iki yöntemle elde edilen grafen numunelerinin yüzey pürüzlülükleri ve SiO₂/Si alttaş üzerine grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafenlerin kalınlıkları AFM ölçümleri ile belirlendi.

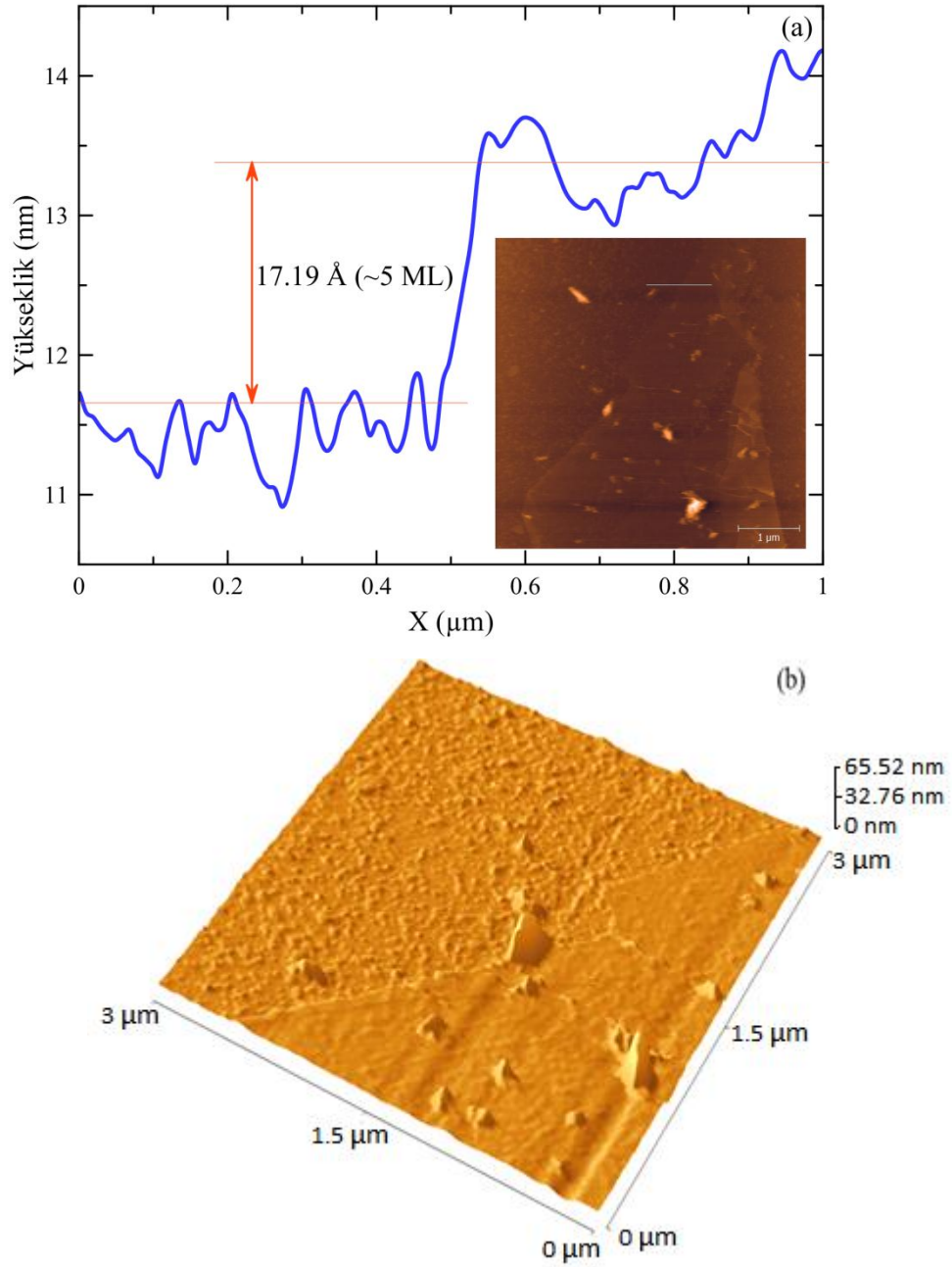
4.4.1. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenler için AFM sonuçları

Grafit soyma yöntemi ile elde edilmiş BG026-R2K1, BG034-R4L15, BG046-R2C10 numunelerinin yüzeyleri AFM ile incelenerek Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'deki sonuçlar elde edilmiştir. AFM ölçümleri tapping modda alınmıştır.



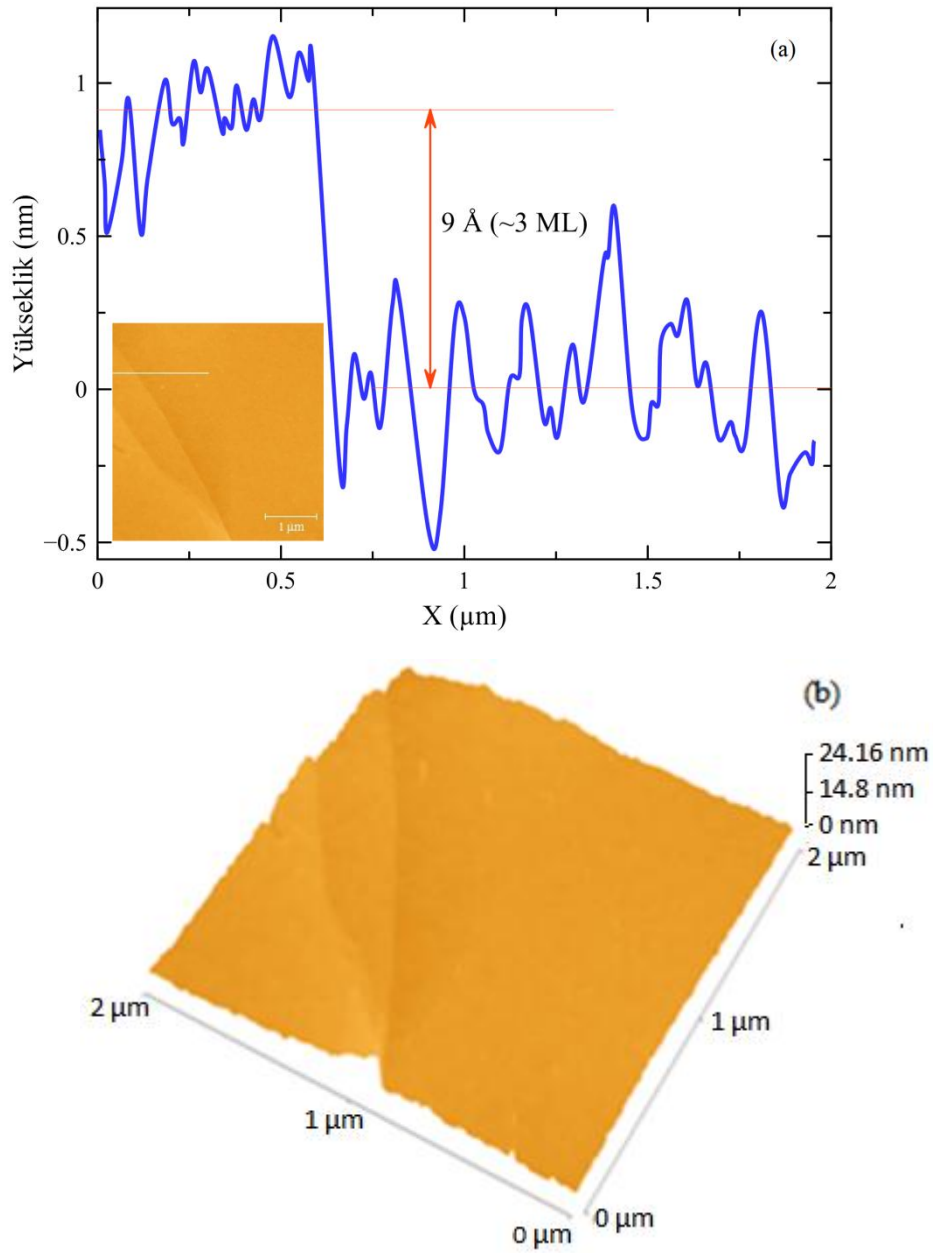
Şekil 4.13. BG026-R2K1 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.

AFM ölçümlerindeki olası hata kaynakları nedeniyle grafen tabakaların kalınlıkları doğru bir şekilde ölçülemeyebilir [65]. Bu nedenle farklı çalışma gruplarında rapor edilmiş grafen tabaka kalınlıkları farklılık göstermektedir. Grafen yüzeyi üzerinde ya da grafen ve alttaş arasında biriken su, azot, oksijen veya argon gibi moleküller, AFM ile grafen kalınlığının 0,34 nm'den daha fazla ölçülmesine neden olur [66, 67]. Bir tabaka grafenin kalınlığı 0,34 nm (1 ML) olduğu için AFM ölçümlerinde gözlenen değerler bu değere bölünerek grafitik yapıların tabaka sayısı elde edilebilir [68]. Şekil 4.13 (a)'da BG026-R2K1 numunesinin yüzey görüntüsü ve grafenin kalınlık analizi gösterilmiştir. Grafenin 2-B görüntüsünde görülen 1 μm uzunluğundaki hat için yükselti analizi yapıldığında iki büyük yükselti farkı olduğu görülmüştür. AFM ucu 0,5 μm 'ye kadar SiO_2 yüzeyi üzerinde iken 0,5 μm 'den sonra grafen yüzeyi üzerine geçmiştir. Bu iki yükselti arasındaki 16,8 Å (~5 ML) fark grafenin ~5 tabaka kalınlığında olduğunu gösterir. Ayrıca SiO_2 yüzeyinin çok pürüzlü olduğu yükselti analizinde görülmektedir. SiO_2 yüzeyindeki bu yükselti farkları grafen tabakaların yüzey üzerinde askıda durmasını sağlar ve bu nedenle yüzeyle daha az etkileşen grafen tabakalar yüksek hareketlilik sergilerler [69, 70]. Bu nedenle grafit soyma yöntemiyle elde edilmiş grafenler epitaksiyel grafenlere göre daha yüksek mobiliteye sahiptir [71]. Şekil 4.13 (b)'de ise yüzeyin 3-B görüntüsü görülmektedir. SiO_2 yüzeyinin basamaklı ve pürüzlü yapısı bu 3-B görüntüde net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, yükseltiyi çok fazla etkileyen büyük kalıntıların varlığında çok net görülmektedir. Bir grafitik yapının grafen özelliği göstermesi için 7 tabakadan fazla olmaması gerekir [72]. 7 tabakadan fazla grafen katman üstüste ise bu yapı grafit özelliği gösterir. Bizim AFM analizlerinde, grafitik yapılar 7 tabakadan (7 ML) daha az olduğu için grafen özelliği gösterecektir.



Şekil 4.14. BG034-R4L15 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.

Şekil 4.14’de BG034-R4L15 numunesinin yükselti analizi ve AFM görüntüleri görülmektedir. Bu numunede de BG026-R2K1 numunesinde olduğu gibi yüzeyde kalıntılar ve SiO₂ yüzeyinde pürüzlülük görülmektedir. Kalıntılar çok büyük yükselti farkı oluşturmaktadır. Yükselti analizinden, bu numuneninde 17,2 Å (~5 ML) kalınlığında olduğu anlaşılmıştır.

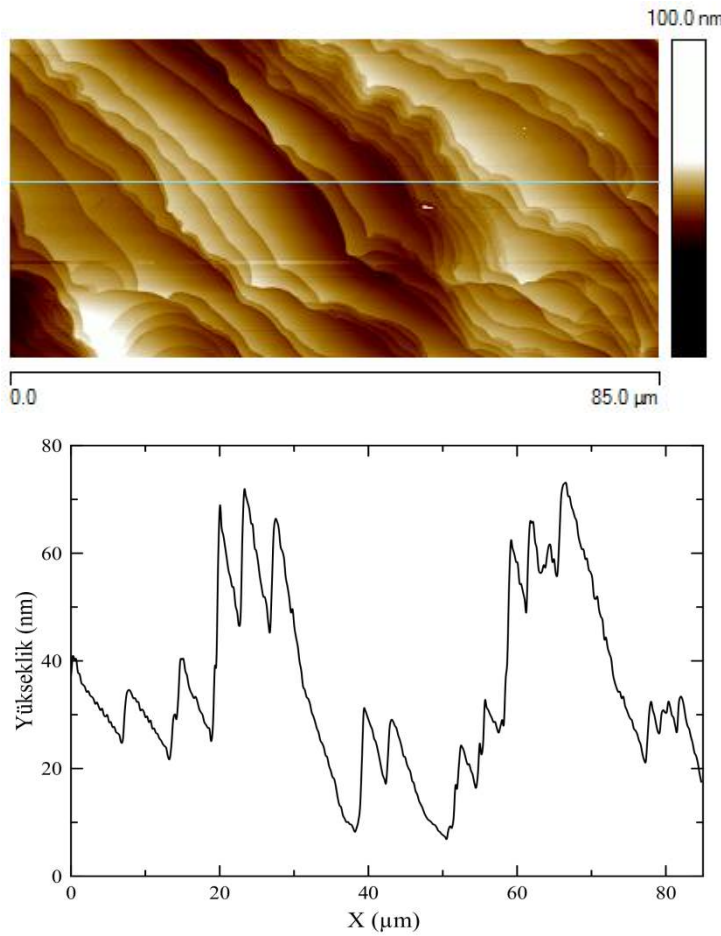


Şekil 4.15. BG046-R2C10 numunesi için AFM ölçümü. (a) Kalınlık analizi ve (b) üç boyutlu görüntüsü.

Şekil 4.15’de BG046-R2C10 numunesinin yükselti analizi ve AFM görüntüleri görülmektedir. Bu AFM ölçümünde, SiO₂ yüzeyinin diğer iki numunenin yüzeyine göre daha temiz olduğu fakat diğerlerinde olduğu gibi yükselti analizinde bu numunede de SiO₂ yüzeyinin pürüzlü olduğu görülmektedir. BG046-R2C10 numunesinin kalınlığı ise 9 Å (~3 ML) olarak ölçülmüştür.

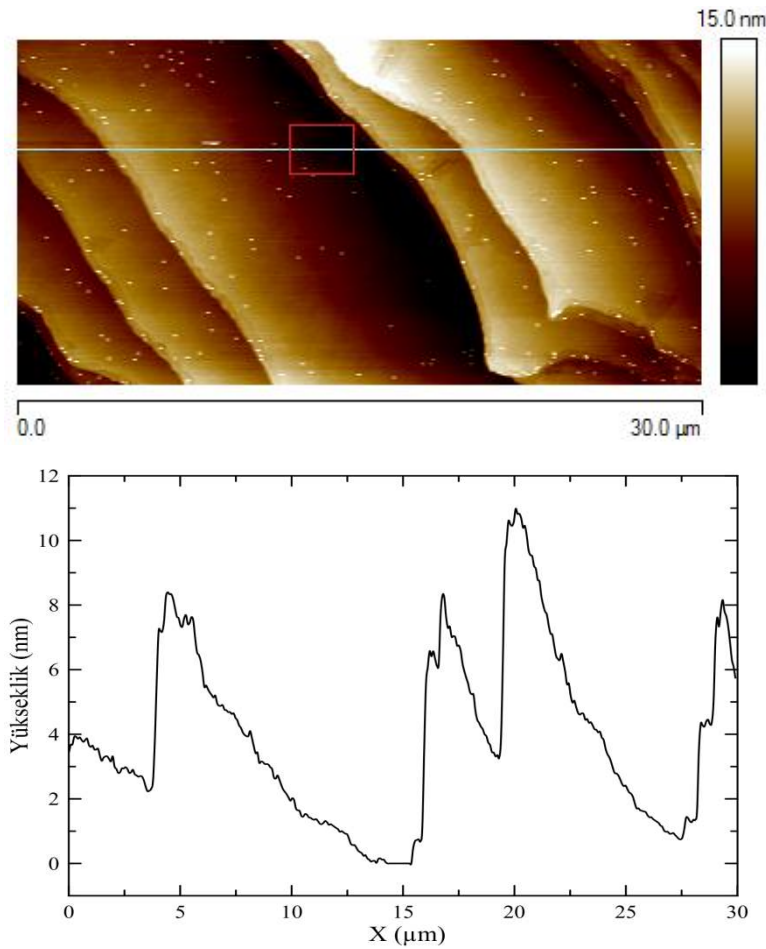
4.4.2. Epitaksiyel yöntem ile elde edilen grafenler için AFM sonuçları

Epitaksiyel büyütme ile elde edilen 932 numunesi için AFM ölçümü alındı ve yüzey özellikleri incelendi. SiC üzerindeki epitaksiyel grafen numunelerinin yüzeyi teraslı yapıya sahiptir ve terasların genişliği komşu basamakların birleşmesiyle önemli ölçüde artış göstermektedir. Bu sonuçlar basamakların birleşmesi ile grafen oluşum sürecine bağlanabilir [73]. SiC alttaş üzerine epitaksiyel grafen büyütme, alttaşın kenar basamaklarındaki teraslarda başlar ve teraslar üzerinde devam eder [74]. Ayrıca, SiC üzerine büyütülen grafenin yüzey morfolojisi ve elektriksel özellikleri alttaş yüzeyinin miscut açısına bağlı olarak değişebilir. Taşıyıcı hareketliliği yüksek miscut açılarında düşükken, daha düşük miscut açılarında daha yüksektir [75].



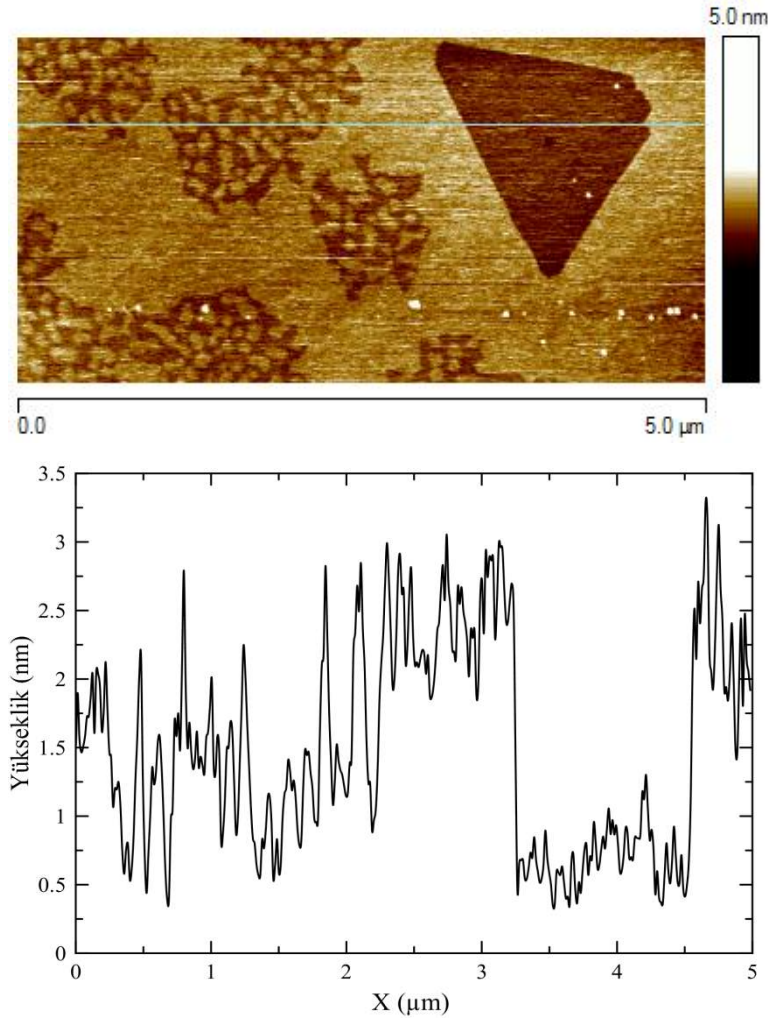
Şekil 4.16. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (85 μm genişlikte), altta; yüzey yükselteleri.

Şekil 4.16’da SiC üzerindeki epitaksiyel grafenin 85 μm genişliğindeki yüzey morfolojisi ve yükselti analizi gösterilmiştir. Birbirine paralel olan geniş teraslar Şekil 4.16’da net olarak görülmektedir. Yüzey morfolojisi görüntüsü üzerindeki çizgi boyunca terasların genişliği çıkarılabilir. Şekilde görüldüğü gibi teraslar çok geniş ve genişlikleri birbirinden farklıdır. Ayrıca, küçük teraslar üzerinde büyüyen çok daha geniş yüzeyli teraslar, yüzey yükseltisinde çok büyük değişimlere neden olmaktadır.



Şekil 4.17. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (30 μm genişlikte), altta; yüzey yükseltileri.

Şekil 4.17’de SiC üzerindeki epitaksiyel grafenin 30 μm genişliğindeki yüzey morfolojisi ve yükselti analizi gösterilmiştir. Yüzey morfolojisi görüntüsünde görülen küçük beyaz lekeler önemsizdir. Küçük kırmızı kare ile gösterilen alanda üçgen benzeri bir iz bulunmaktadır. Bu üçgen benzeri izin ayrıntılı incelenmesi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Teraslı yapı Şekil 4.17’de de net olarak görülmektedir.

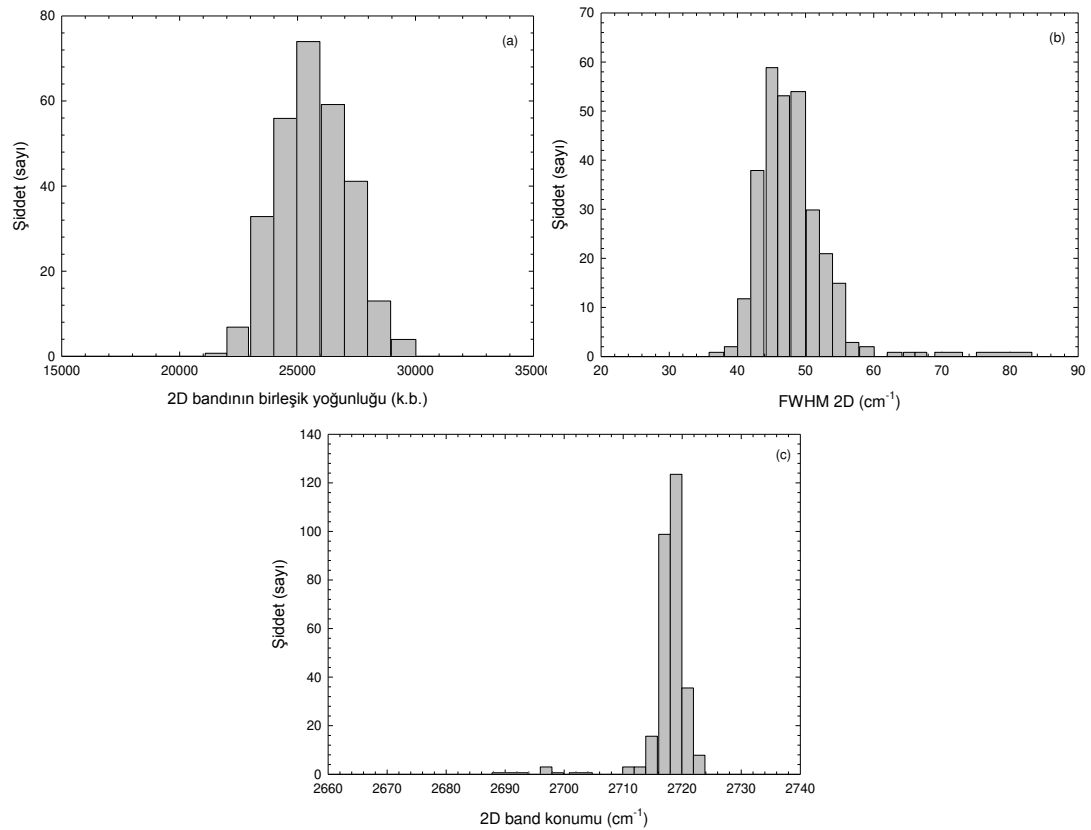


Şekil 4.18. 932 numunesi için AFM ölçümü. Üstte; AFM görüntüsü (5 μm genişlikte), altta; yüzey yükseltileri.

Şekil 4.18’de SiC üzerindeki epitaksiyel grafenin 5 μm genişliğindeki yüzey morfolojisi ve yükselti analizi gösterilmiştir. Bu şekilde görülen yükseklik adımları, alttaş ya da diğer grafen tabakalar üzerine kümelenmiş bir ya da daha fazla katmanlı grafen tabakalarla ilişkili olabilir. Şekil 4.18’de grafenin yüzey morfolojisi görüntüsünde görülen büyük üçgen benzeri görüntü, üstünde grafen tabakası bulunmayan SiC alttaş yüzeyidir. Yüzey morfolojisinde görülen çizgi boyunca yükselti analizi yapıldığında üçgen benzeri görüntünün yükseltisinin daha az olduğu yani SiC alttaş yüzeyi olduğu anlaşılmaktadır. Bu yükselti analizinden epitaksiyel grafen tabakalarının yaklaşık olarak 2 nm kalınlığında (~ 6 ML) olduğu anlaşılmaktadır.

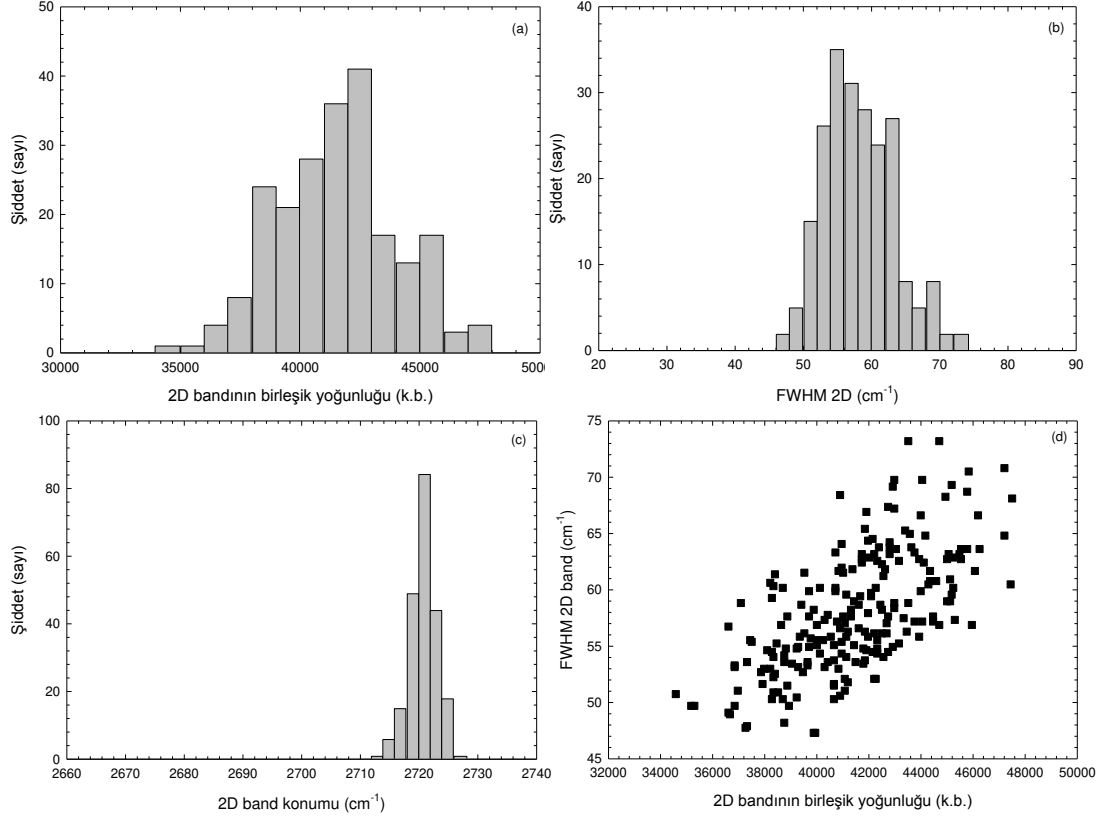
4.5. Raman Ölçümleri

Bu tez çalışmasında, 932 ve 934 kodlu epitaksiyel grafen numuneleri için Raman ölçümleri Polonya'da bulunan Elektronik Malzemeler Teknoloji Enstitüsü'ndeki (ITME) Raman sistemi kullanılarak alınmıştır. Grafenin Raman spektrumundaki 2D piki grafenin varlığını gösteren bir Raman pikidir ve bu 2D piki tek tabaka grafende sadece bir pik iken çift tabakalı grafende, grafenin band yapısının gelişimini yansıtan dört band haline ayrılır [54]. Raman spektrumunun 2D bandının band genişliği, SiC üzerindeki epitaksiyel grafenin tabaka sayısını ayırmayı sağlayan bir özelliktir [76]. Ayrıca, 2D bandının yarı yükseklik tam genişliğinin (FWHM) analizi grafen filmin kalınlığının belirlenmesine olanak sağlar [77]. Gergin tek tabakalı grafen spektrumunun 2D piki dar ve keskin iken basamak kenarlarına yakın çok tabakalı grafen için geniş ve zayıf bir 2D piki gözlenmektedir [77].



Şekil 4.19. 932 kodlu numunenin Raman ölçüm verileri.

Şekil 4.19’da 932 kodlu numune için Raman ölçüm verileri gösterilmiştir. Şekil 4.19 (a)’da 2D bandının birleşik yoğunluğunun dağılımı görülmektedir. 2D bandının birleşik yoğunluğu 25458’de iken, şiddetinin diğer yoğunluk değerlerindeki şiddetlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.19 (b)’de ise FWHM sayısı verilmiştir. 45,07 cm^{-1} ’de görülen FWHM değeri en yüksek değerde iken diğer FWHM değerlerinin daha az değerde olduğu görülmektedir. FWHM değerinin düşük olması 2D pikinin dar olduğu gösterir. Bu durumda grafen tabaka sayısının az olduğunu anlaşılır. Tek tabakalı bir epitaksiyel grafen için FWHM değeri $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$ iken dört tabakalı bir epitaksiyel grafen için FWHM değeri $\sim 60 \text{ cm}^{-1}$ olarak bulunmuştur [78]. Bu numunenin FWHM değeri genel olarak 40 cm^{-1} ile $\sim 60 \text{ cm}^{-1}$ arasında değiştiği fakat en yoğun 45,07 cm^{-1} ’de olduğu görülmektedir. Bu verilerden 932 kodlu numunenin 1 tabaka ile 4 tabaka arasında değişen kalınlıklara sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.19 (c)’de ise band konumunun dağılımı gösterilmiştir. Bu numunenin band konumu dağılımının genel olarak 2710 cm^{-1} ile 2722 cm^{-1} arasında değiştiği görülmektedir. 1-2 tabakalı bir epitaksiyel grafenin 2D piki yaklaşık olarak 2724 cm^{-1} ’de görülmektedir [79]. Şekil 4.19 (c) incelendiğinde 932 kodlu numunenin farklı kalınlıklarda olduğu ve 2D band konumunun yaklaşık olarak 2720 cm^{-1} ’de en yoğun olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan 932 kodlu numunesinde genel olarak 1-2 tabaka arasında değişen kalınlıkların yoğun olduğu sonucu çıkarılabilir. Band konumu 2700 cm^{-1} ’e yaklaştıkça epitaksiyel grafen tabaka kalınlığı artmaktadır. Bu numune için alınan Raman ölçümü sonuçlarından 932 kodlu numunenin yaklaşık olarak 2 tabaka kalınlığında olduğu sonucunu çıkarabiliriz.



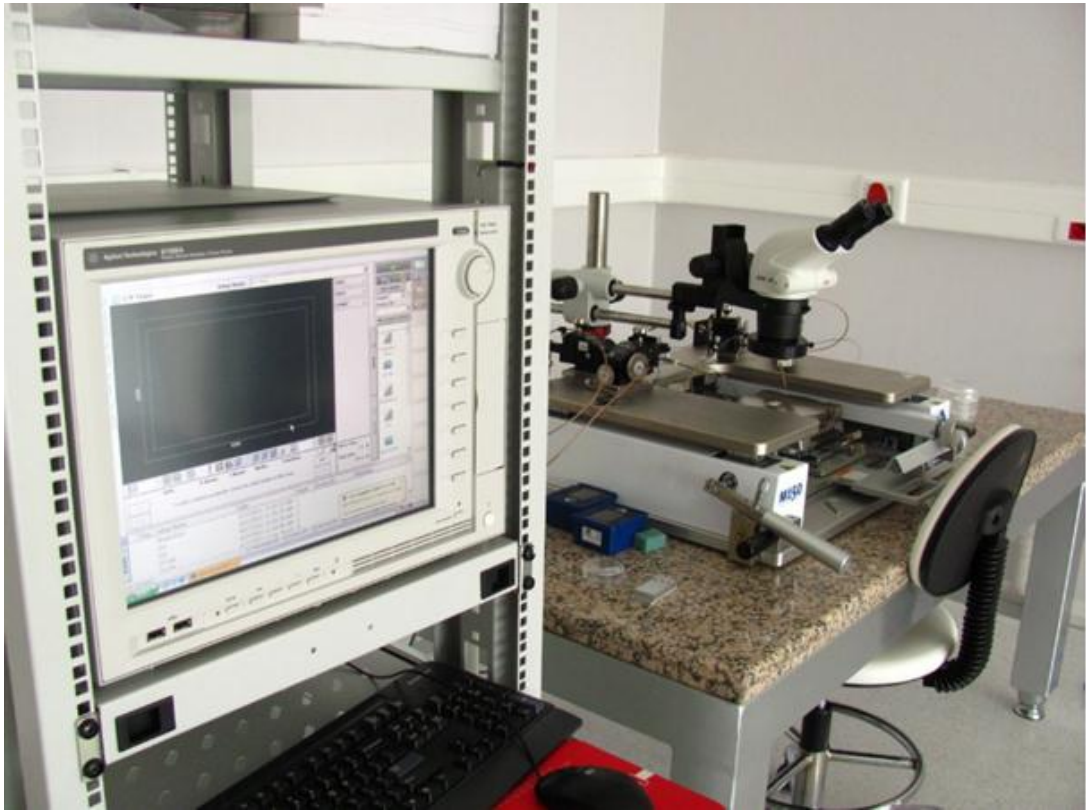
Şekil 4.20. 934 kodlu numunenin Raman ölçüm verileri.

Şekil 4.20’de 934 kodlu numune için Raman ölçüm verileri gösterilmiştir. Şekil 4.20 (a)’da 2D bandının birleşik yoğunluğunun dağılımı görülmektedir. 2D bandının birleşik yoğunluğu 42477’de iken, şiddetinin diğer yoğunluk değerlerindeki şiddetlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.20 (b)’de ise genel olarak 47 cm^{-1} ile 73 cm^{-1} arasında değişen FWHM dağılımı verilmiştir. Bu FWHM dağılımında, kalınlığın bölgesel olarak değişiklik gösterdiği epitaksiyel grafen numunesinde 54,92 cm^{-1} FWHM’ye sahip daha geniş grafen bölgesinin olduğu görülmektedir. FWHM dağılımının $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$ ’den çok büyük olduğu ve daha çok 60 cm^{-1} civarında yoğunlaştığı görülmektedir. Buradan 934 kodlu numunenin yaklaşık olarak 4 tabaka olduğu anlaşılıyor. Şekil 4.20 (c)’deki band konumunda ise 2720 cm^{-1} civarında daha yoğun olduğu görülmektedir. 2D band konumu 1-2 tabakalı grafenin konumuna benziyor fakat FWHM değeri yüksek olduğu için 1-2 tabakadan daha fazla olduğu söylenebilir. Şekil 4.20 (d)’de 2D band birleşik yoğunluğuna bağlı olarak 2D bandının FWHM’si gösterilmiştir. 2D band birleşik yoğunluğu arttıkça

FWHM değerinin de arttığı görülmektedir. 2D band birleşik yoğunluğu arttıķa tabaka sayısı artmakta ve FWHM değeri 55 cm^{-1} ile 60 cm^{-1} arasında iken dağılımın çok daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan 934 kodlu numunenin 3-4 tabaka arasında olduğu sonucu çıkarılabilir.

4.6. I-V  l  mleri

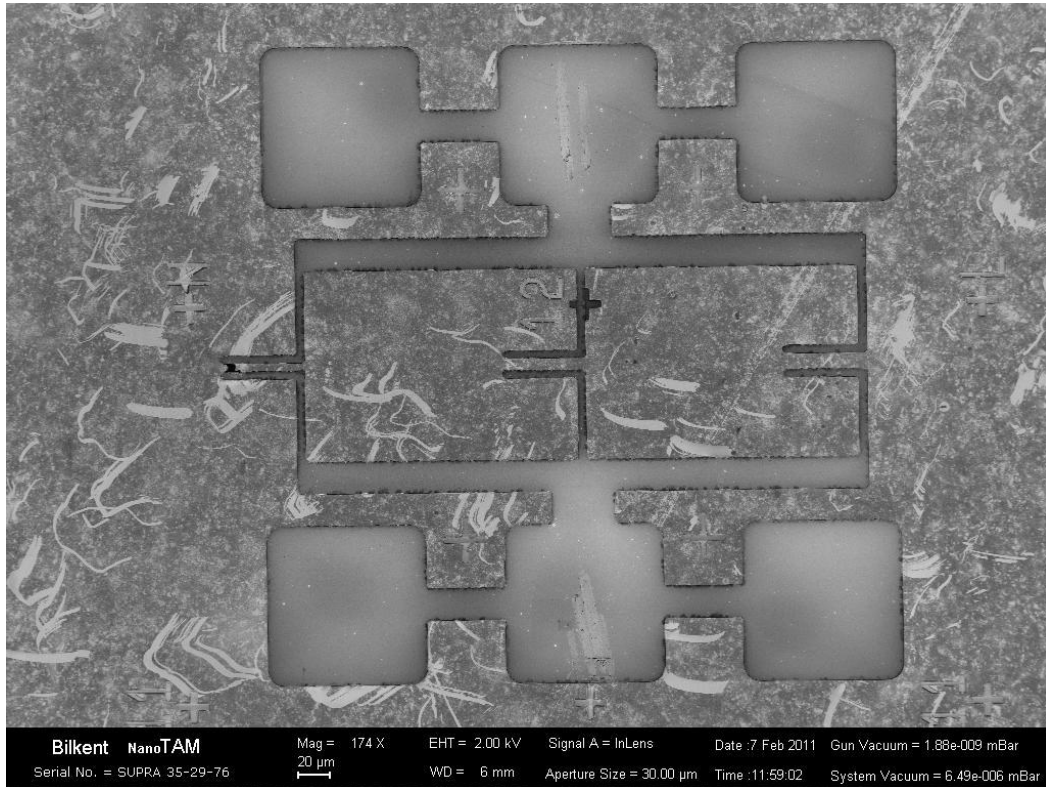
Bu bölümde grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiş grafen numunelerinin akım-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenlerin I-V karakteristiklerini ölçmek için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesindeki darbeli yarıiletken analiz sistemi (Resim 4.1) kullanılmıştır. Epitaksiyel yöntem ile elde edilen grafenlerin akım-voltaj ölçümleri ise Lake Shore Hall etkisi ölçüm sisteminde alınmıştır.



Resim 4.1. Agilent B1505A Semiconductor Device Analyzer ve M150 sonda istasyonundan oluşan darbeli yarıiletken analiz sistemi.

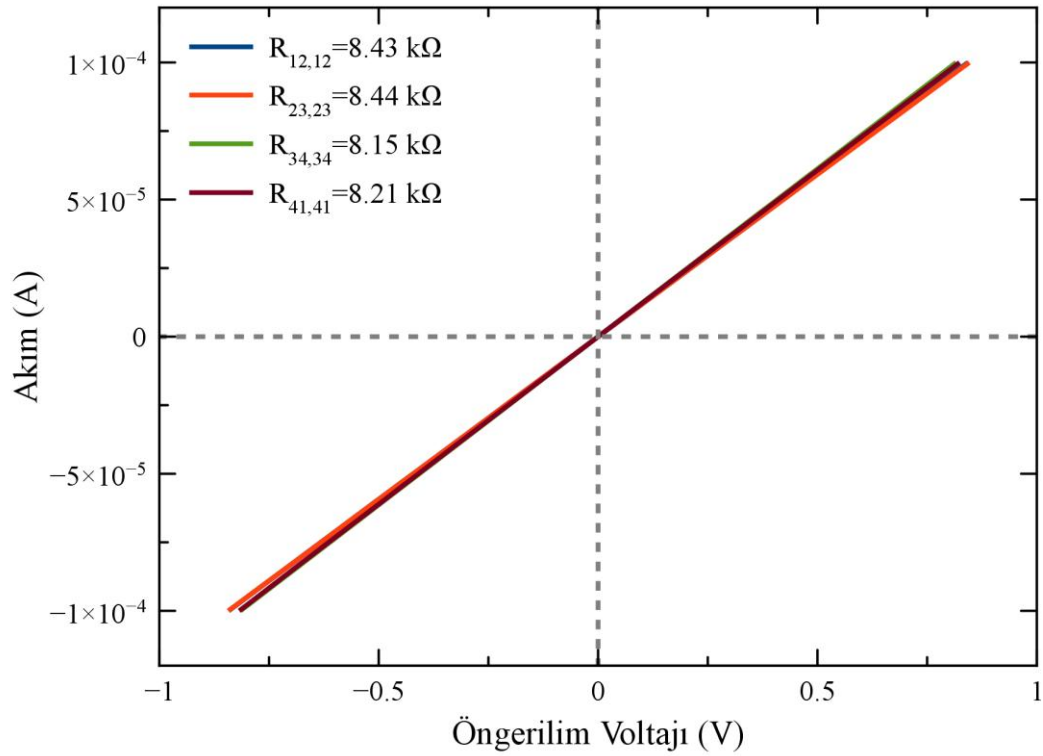
4.6.1. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenler için I-V ölçümleri

Grafit soyma yöntemi ile elde edilen BG030_R4N12 ve BG029_R1L0 numuneleri için akım-voltaj ölçümü alınmıştır. Bu ölçümler için Şekil 4.21'deki SEM görüntüsünde görülen, iki metal kontağı olan yapılar üretilmiştir.



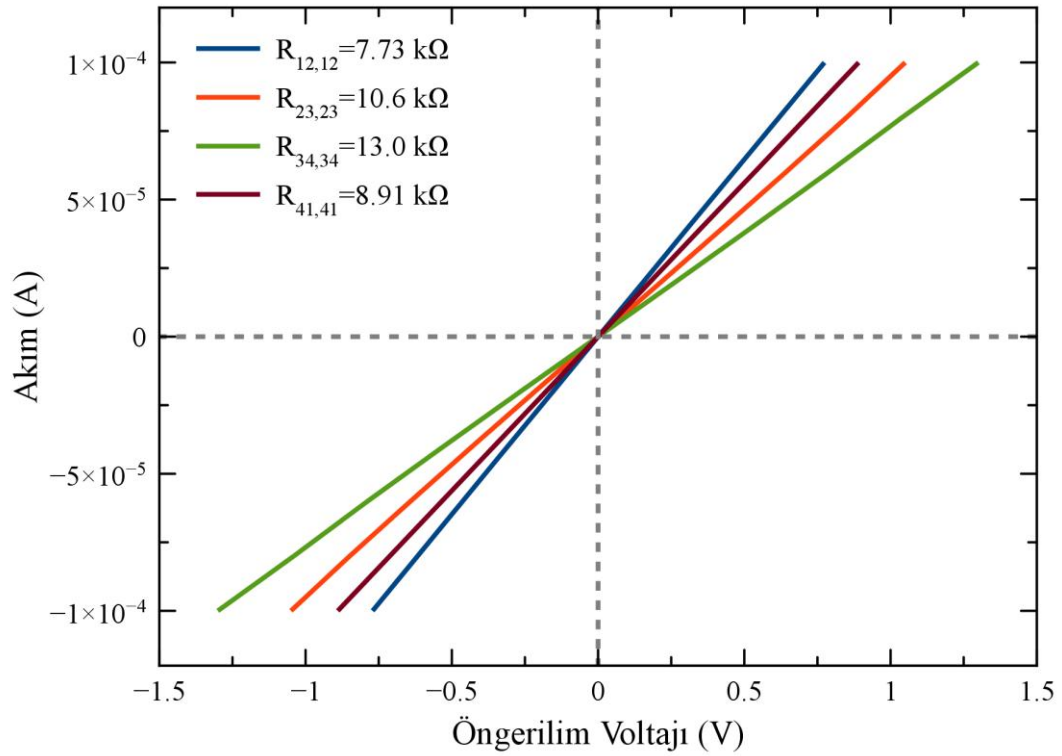
Şekil 4.21. Metal pedleri ile BG030_R4N12 numunesinin SEM görüntüsü.

Akım-voltaj ölçümleri Şekil 4.21'de görülen büyük kontak pedleri üzerine darbeli yarıiletken analiz sisteminin iki probu temas ettirilerek alınmıştır. Metal-grafen kontaklar oda sıcaklığında, bir metal-yarıiletken sistemine benzer olarak ohmik davranış sergilerler. Grafen tabanlı aygıtlarda kontak direncini kontrol etmek aygıt performansı ve geliştirilmesi açısından önemlidir [80]. Ayrıca, metalden grafene yük transferi, bulk grafen düzlüğün içindeki taşıyıcıların polaritesine bağlı olarak grafenede bir p - p , n - n ya da p - n ekleme yol açabilir [81].



Şekil 4.23. 932 kodlu numunenin akım-voltaj ölçümü.

Şekil 4.23’de 932 kodlu numunenin akım-voltaj eğrisi görülmektedir. Dört kontak için alınan akım-voltaj ölçümü sonucunda, kontaklar arasındaki dirençlerinin neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafen numunelerinin dirençlerinin epitakseyel grafen numunelerinin dirençlerine göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafenlerin epitakseyel grafenlerden daha ince ve safsızlık miktarının çok daha az olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafenler SiO_2 alttaş üzerindeki pürüzler nedeniyle askıda durarak alttaş ile daha az etkileşime girdikleri için taşıyıcılar alttaştan gelen safsızlıklardan daha az etkilenir ve bu nedenle akım iletimi epitakseyel grafenlerden daha iyidir.



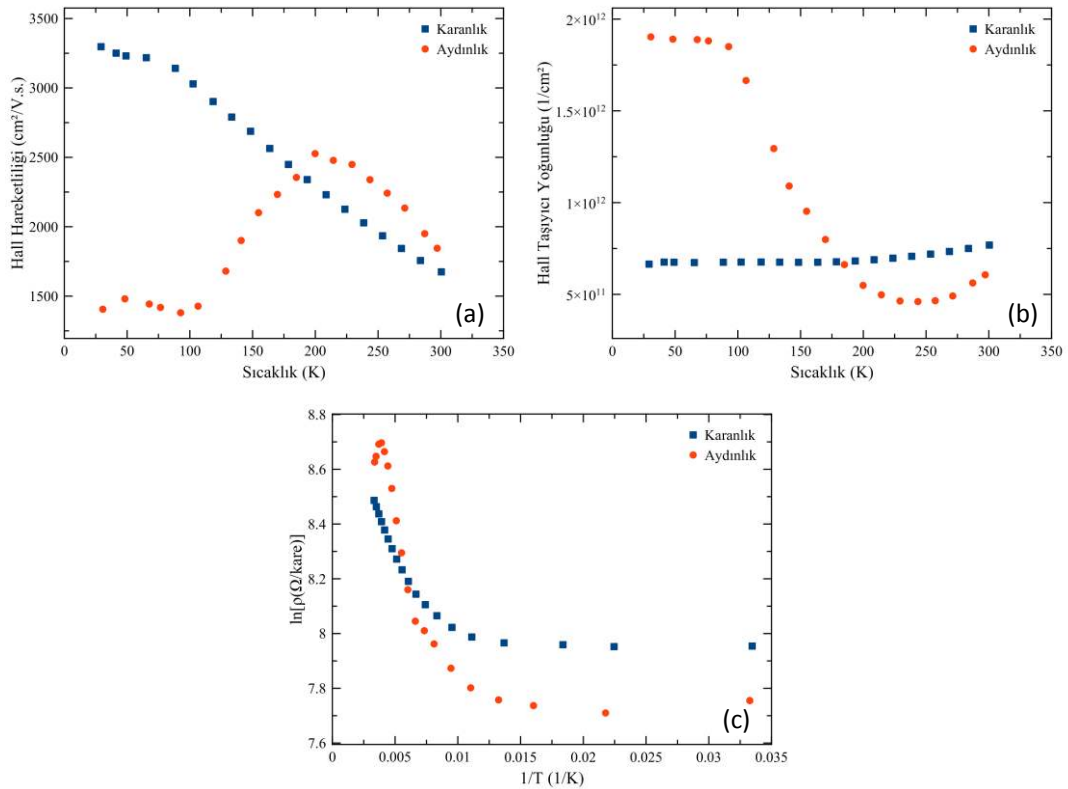
Şekil 4.24. 934 kodlu numunenin akım-voltaj ölçümü.

Şekil 4.24’de 934 kodlu numunenin akım-voltaj eğrisi görülmektedir. Dört kontak için alınan akım-voltaj ölçümü sonucunda, dört kontak arasında ölçülen dirençlerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu numunenin direnci de grafit soyma yöntemiyle elde edilen grafenlerin direncinden daha yüksektir. Farklı kontaklar arasındaki dirençlerin birbirinden farklı çıkmasının nedeni geniş alan üzerine dağılmış olan epitaksiyel grafen tabakalarının kalınlıklarının homojen olmaması olabilir.

4.7. Işık Taşıyıcı Yoğunluğu ve Hareketliliğine Etkisi

932 ve 934 epitaksiyel grafen numunelerinde ışık taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliği üzerine etkilerini görmek için sabit manyetik alan (4,5 kG) altında, 25-300 K sıcaklık aralığında grafen numuneleri mavi ışıkla aydınlatılarak Hall etkisi ölçümleri alındı. Işık enerjisi arttıkça grafenin soğurma spektrumunda da artış

meydana gelmektedir [82]. Bu nedenle, epitaksiyel grafen tabakasını uyarmak için yüksek enerjili mavi ışık (2,64 eV) tercih edilmiştir. Ölçüme başlamadan önce numunelerin ohmik olup olmadığına bakıldı ve ohmik olduğu görülen numunelerin 300–25 K sıcaklık aralığında sabit manyetik alan (4,5 kG) altında Hall ölçümü alındı. Ölçüm tamamlandıktan sonra, sıcaklık 25 K’de iken mavi LED ile 30 dakika aydınlatıldı. Daha sonra, mavi ışık altında 25 K’den 300 K’e kadar, sabit manyetik alan (4,5 kG) altında Hall ölçümü alındı. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi SiC üzerindeki epitaksiyel grafen numunesinin aktif yüzü (grafen bulunan) numune tutucuya dönüktür. Fakat 4H-SiC ve 6H-SiC optik geçirgen olduğu için SiC üzerine düşürülen mavi ışık grafene ulaşmaktadır. Oda sıcaklığında, 4H-SiC ve 6H-SiC için optik soğurma sınırı sırasıyla 3,2 eV ve 3,0 eV, daha yüksek enerjilerde optik soğurma artmaktadır [83]. Bu enerjilerden daha düşük enerjilerde 4H-SiC ve 6H-SiC’ün optik geçirgenlikleri yüksektir fakat 4H-SiC’ün optik geçirgenliği 6H-SiC’e göre daha fazladır. Foton enerjisinin 3,2 eV ve 3,0 eV’dan yüksek olduğu durumlarda SiC ışığı yüksek oranda soğurur. Bu enerjilerden daha düşük enerjilerde optik soğurma çok azdır. 6H-SiC’ün 3,0 eV’dan daha düşük enerjilerde optik soğurması 4H-SiC’den çok daha azdır ve 4H-SiC’ün optik geçirgenli 2,5 eV ve 3,2 eV arasında lineer bir artış göstermektedir [84,85]. Mavi ışığın enerjisi 2,64 eV olduğu için SiC alttaştan geçerek epitaksiyel grafen tabakasını uyaracaktır fakat 3,2 eV ve 3,0 eV soğurma sınırlarına yakın olduğu için SiC alttaş tarafından az miktarda soğurulacağı da unutulmamalıdır. Tek tabaka grafen, üzerine düşen beyaz ışığın %2,3’ünü soğurmaktadır fakat bizim ölçümlerde kullandığımız numuneler 1 tabakadan kalın olduğu için ışık daha yüksek oranda soğurulacaktır [38]. Numuneler tek tabaka grafen olmadığı için lineer bir soğurma spektrumu bulunmamaktadır [82]. Ayrıca kızıl ötesi soğurma spektrumunda, grafenin su (H_2O) soğurması nedeniyle C-H titreşim bandlarından kaynaklanan bazı keskin pikler meydana gelir [38].

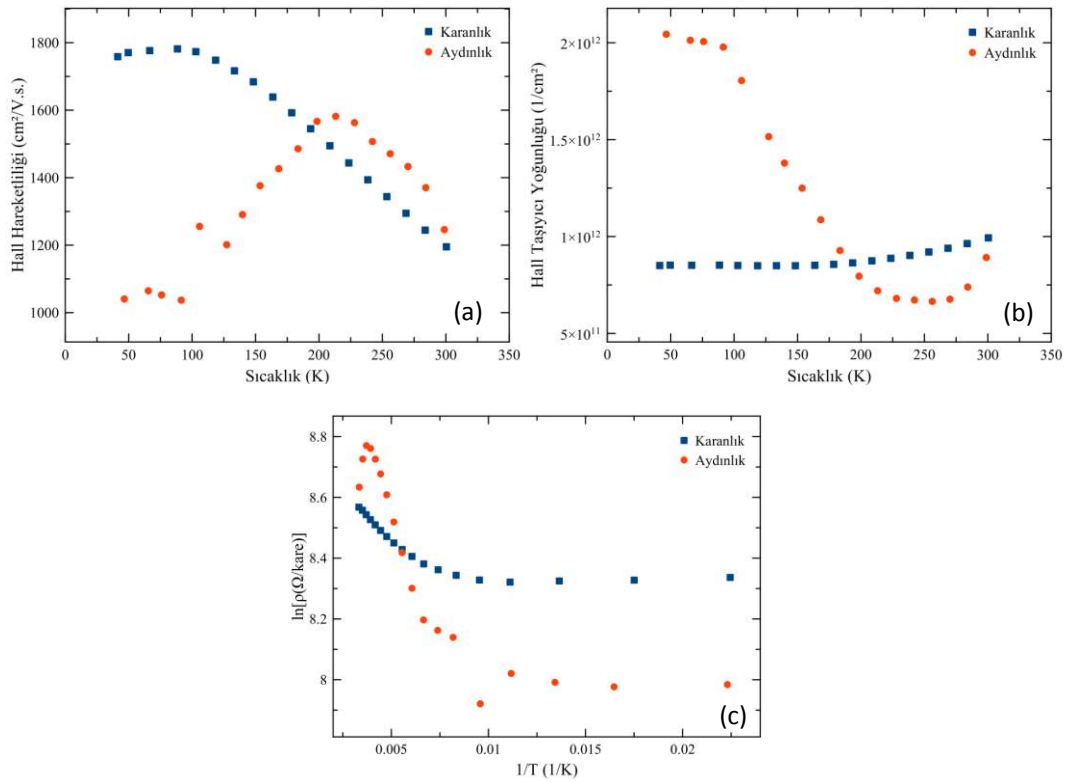


Şekil 4.25. 932 kodlu numunenin karanlık ve ışıklı ortamda Hall ölçümü sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (c) Sıcaklık ile öz direncinin değişimi.

Şekil 4.25’de 932 kodlu numune için sabit manyetik alan altında, 25-300 K sıcaklık aralığında alınan aydınlık ve karanlık ölçüm verileri görülmektedir. Karanlık ölçümde, Şekil 4.25 (a)’da görüldüğü gibi sıcaklığın düşmesiyle taşıyıcı hareketliliği artmaktadır. Aydınlık ölçümde ise, 100 K’den düşük sıcaklıklarda hareketlilik sabit ve karanlık ölçüme göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu sıcaklıkta safsızlık saçılmasının karanlık ölçüme göre çok daha baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Aydınlık ölçümde daha fazla safsızlık uyarıldığı için safsızlık saçılması bu ölçümde hareketliliği karanlık ölçüme göre çok daha fazla sınırlamaktadır. 100 K’den sonra safsızlık saçılmalarının etkisi azalmaya başlar ve fonon saçılmaları baskın olmaya başlar. 100 K’den 200 K’e kadar taşıyıcı hareketliliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 4. 25 (a)). Bu sıcaklık aralığında fonon saçılmaları safsızlık saçılmaları kadar baskın olmadığı için hareketlilik artmıştır. Aydınlık ölçümde, 200 K’den sonraki sıcaklıklarda fonon saçılmaları dahada baskın

hale geldiği için hareketlilik tekrar azalmaya başlar. Fakat 200 K'den sonraki hareketlilik karanlık ölçümdeki hareketlilik sonuçlarından daha yüksek olduğu görülür. Aydınlik ölçümlerde 200 K'den sonra taşıyıcı yoğunluğunun parabolik olarak artmasının nedeni SiC ve grafendeki safsızlıkların termal uyarılmasından kaynaklanıyor olabilir.

Bir yarıiletkendeki 2DEG (2-boyutlu elektron gazı) sisteminde aydınlık ölçümlerde taşıyıcı yoğunluğu artarken taşıyıcı hareketliliği de artmaktadır [86]. Epitaksiyel grafenin aydınlık ölçümlerde belirli bir sıcaklık aralığında taşıyıcı yoğunluğu artmasına karşın 2DEG sisteminde olduğu gibi taşıyıcı hareketliliğinde bir artış olmamaktadır. 100 K altında ise aydınlık ve karanlık ölçümlerde hareketlilikleri sıcaklıktan bağımsızdır. Karanlık ölçümdeki taşıyıcı yoğunluğu 2DEG sistemlerinde olduğu gibi sıcaklıktan bağımsız ve hareketlilik baskın safsızlık saçılması nedeniyle sınırlandırılmıştır. Şekil 4.25 (c)'de ise öz direncin sıcaklık bağımlılığı gösterilmiştir. Karanlık ölçümde, sıcaklığın azalmasıyla öz direnç azalmakta dolayısıyla, iletkenlik ise artmaktadır. Sıcaklık 100 K altında iken iletkenlik değişmemektedir. Aydınlik ölçümde ise, yüksek sıcaklıklarda (200–300 K) karanlık ölçüme göre öz direncin parabolik olarak arttığı 200 K'den daha düşük sıcaklıklarda ise öz direncin 100 K'e kadar azaldığı daha sonra sabitlendiği görülmektedir. Aydınlik ölçümde, 200 K'den düşük sıcaklıklarda hareketlilik karanlık ölçüme göre daha düşük fakat taşıyıcı yoğunluğunun daha yüksek olduğunu görülmektedir. İletkenlik ise bu sıcaklık aralığında hareketlilikteki büyük düşüşe rağmen aydınlık ölçümde daha yüksektir.



Şekil 4.26. 934 kodlu numunenin karanlık ve ışıklı ortamda Hall ölçümü sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (c) Sıcaklık ile öz direncin değişimi.

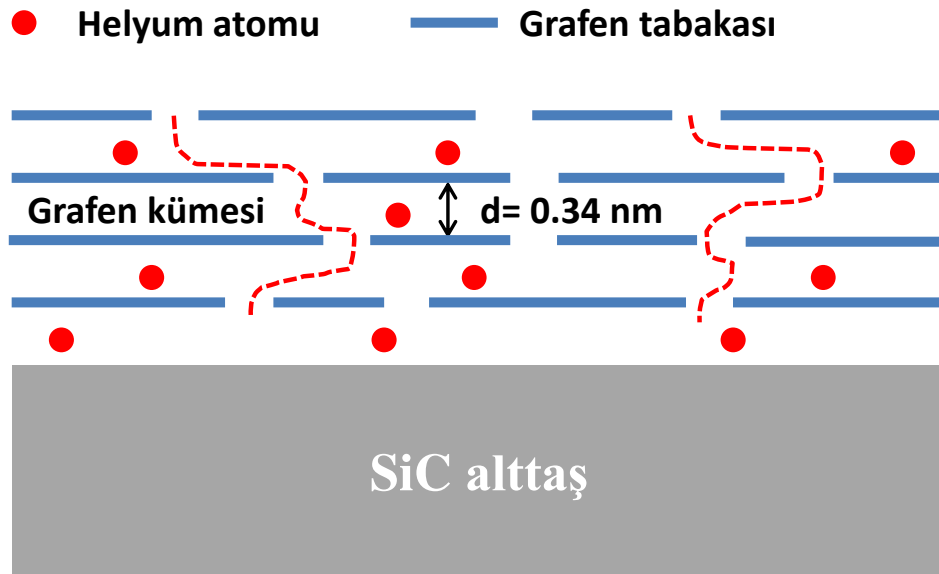
Şekil 4.26’da 934 kodlu numune için sabit manyetik alan altında, 25-300 K sıcaklık aralığında alınan aydınlık ve karanlık ölçüm verileri görülmektedir. 932 kodlu numunede görülen iletim mekanizmasının aynısı bu numunede de görülmektedir. Her iki ölçümde de 100 K’den daha düşük sıcaklıklarda taşıyıcı hareketliliği sıcaklıktan bağımsız ve hareketlilik baskın safsızlık saçılması ile sınırlanmaktadır. Mavi ışıkla uyarılan grafen üzerindeki ve SiC’deki safsızlıklardan gelen taşıyıcılar, taşıyıcı yoğunluğunda artışa ve safsızlık saçılmasının atmasıyla hareketlilikte azalmaya yol açmaktadır. 932 numunesinde olduğu gibi bu numunede de aydınlık ölçümde, 100-200 K sıcaklık aralığında taşıyıcı yoğunluğu azalırken hareketlilik artmaktadır. Bu sıcaklık aralığında fonon saçılması baskın olmasına karşın hareketlilik sıcaklığın artmasıyla artmaya devam etmektedir. Bunun sebebi olarak safsızlık saçılmaları hareketliliğinin fonon saçılmalarına göre daha fazla sınırlaması gösterilebilir. 200 K’de ise hareketlilikteki artış durmakta ve fonon saçılmasındaki

artış nedeniyle 200 K'den sonraki sıcaklıklarda hareketlilik tekrar azalmaya başlamaktadır. İletkenlik de 200 K'den düşük sıcaklıklarda aydınlık ölçümde karanlık ölçüme göre daha yüksektir.

4.8. Helyum Gazı ve Suyun Ölçümlere Etkisi

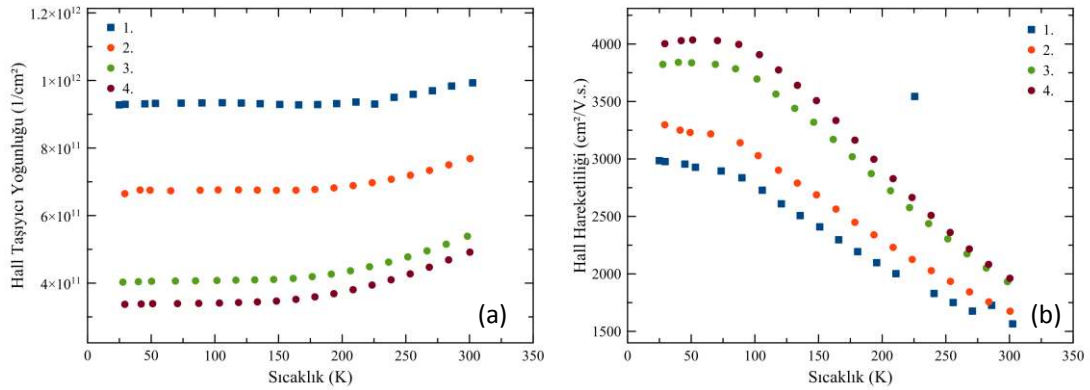
4.8.1. Helyum gazının etkisi

932 ve 934 numulerinde Helyum gazının ölçümlere etkisini görmek için her bir numune için belirli aralıklarla arka arkaya dört kez Hall ölçümü alındı. Daha sonra iki grafen düzlük arasına yerleştirilen bir helyum atomunun hareketini ve grafenin band yapısına etkisini görmek amacıyla iki grafen düzlük arasında farklı konumlara yerleştirilen helyum atomu için DFT hesaplamaları yapıldı. Grafen tabakaları arasındaki kanallar boyunca helyum, su, etanol, hekzan, aseton, dekan ve propanol, azot, argon ve hidrojen molekülleri sızabilmektedir. Bunlar arasında grafen tabakaları arasında en yüksek oranda sızan su molekülleridir, en az sızan ise helyum atomlarıdır. H₂O grafen tabakaları boyunca He'dan en az 10^{10} kat daha hızlı sızar [87].



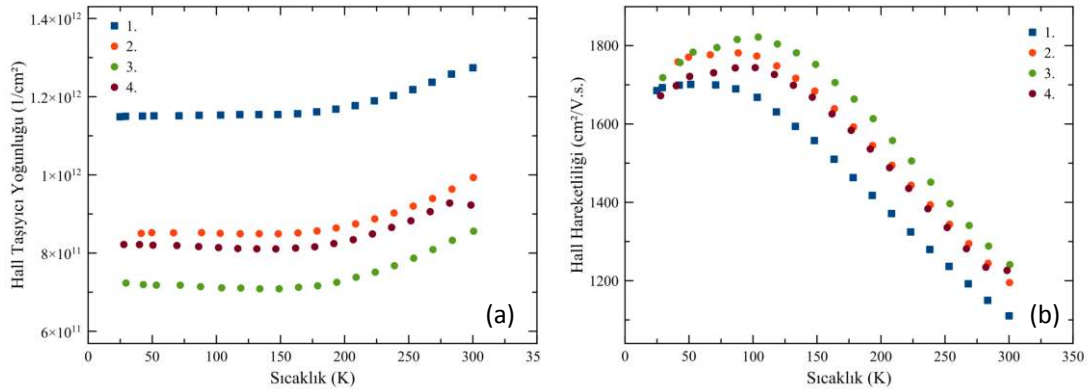
Şekil 4.27. SiC alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüş birkaç tabakalı grafenin tabakaları arasına sızan helyum (He) atomlarının temsili gösterimi.

Şekil 4.27’de He atomlarının grafen tabakaları arasından sızması gösterilmiştir. Grafen düzlük üzerine yaklaşan bir He atomu ilk olarak grafenin üst yüzeyine bağlı H atomları varsa onlarla etkileşir daha sonra alt tabakalardaki C atomlarıyla etkileşir [88].



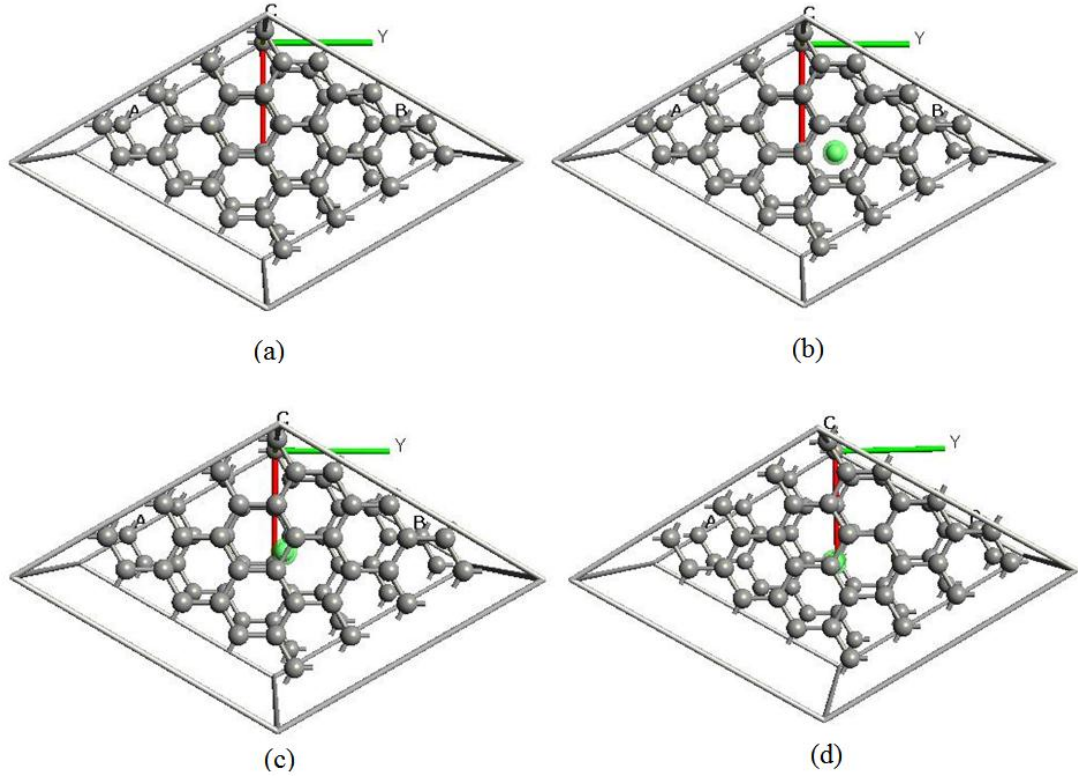
Şekil 4.28. 932 kodlu numunenin farklı zamanlarda alınan 4 ölçüm sonucu. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği.

Şekil 4.28’de 932 kodlu numune için belirli zaman aralıklarıyla alınan dört Hall ölçümü sonucu gösterilmiştir. Taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliğinin her ölçüm sonucunda değiştiği görülmektedir. Taşıyıcı yoğunluğu ilk ölçümden sonraki her ölçümde bir miktar azalmıştır fakat her ölçümde beklenildiği gibi taşıyıcı yoğunluğu sıcaklıktan bağımsızdır. Taşıyıcı hareketliliği ise 1. ölçümde en az iken 4. Ölçüm sonunda en yüksek değerlere ulaşmıştır. Her ölçümde, 100 K’den düşük sıcaklıklarda hareketlilik sıcaklıktan bağımsızdır. Taşıyıcı yoğunluğundaki azalma, SiC alttaş ile grafen tabakasının başladığı bölgeye He atomlarının girerek, grafen tabakasını SiC alttaştan uzaklaştırmasıyla SiC’den gelen ek taşıyıcıların engellenmesi sonucu kaynaklanabilir.



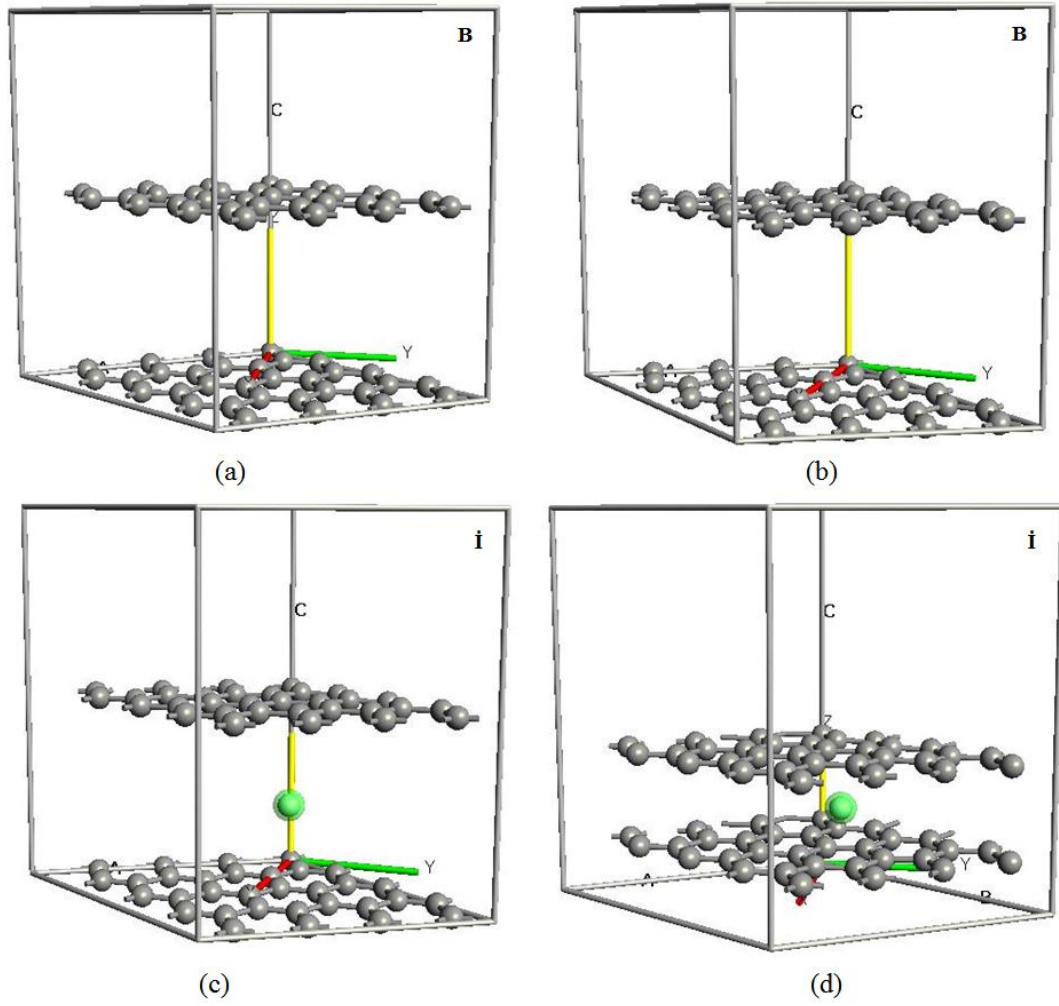
Şekil 4.29. 934 kodlu numunenin farklı zamanlarda alınan 4 ölçüm sonucu. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği.

Şekil 4.29’da 934 kodlu numunenin belirli zaman aralıklarıyla alınan dört Hall ölçümü sonucu gösterilmiştir. Bu numunede de 932 numunesinde olduğu gibi her ölçüm sonunda taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı hareketliliğinde değişim gözlenmiştir. 934 numunesinde 1., 2., ve 3. ölçüm sonucunda 932 numunesinde olduğu gibi taşıyıcı yoğunluğu ilk ölçümden sonra belli bir miktar azalmıştır hareketlilikte taşıyıcı yoğunluğundaki azalmaya bağlı olarak her ölçüm sonucunda artmıştır. 934 numunesinde 932 numunesinden farklı olarak 4. ölçümde taşıyıcı yoğunluğu bir miktar artarak 3. ölçümden biraz daha fazla olmuştur ve hareketlilikte buna bağlı olarak azalmıştır. 4. ölçümde taşıyıcı yoğunluğundaki artışın nedeni olarak, grafen yüzeyine su buharı ya da oksijen gazı birikmesi sonucu grafen katkılanarak taşıyıcı yoğunluğunu arttırmış olması akla gelmektedir. Yine de bu davranış bilginiz dahilinde açıklanamamaktadır. Bu numunede de taşıyıcı yoğunluğundaki kademeli azalmanın nedeni grafen tabakaları arasına He sızmasından kaynaklanıyor olabilir. Grafen tabakaları arasına sızan He gazının etkisini net bir şekilde görmek amacıyla iki grafen düzlük arasına farklı konumlarda He atomu yerleştirildi ve DFT hesaplamaları yapılarak, He’un konumu ve grafenin band yapısına etkileri incelendi. DFT hesaplamaları, bu tezin konusu dahilinde olmayıp sadece etkileri üzerinde durulmuştur.



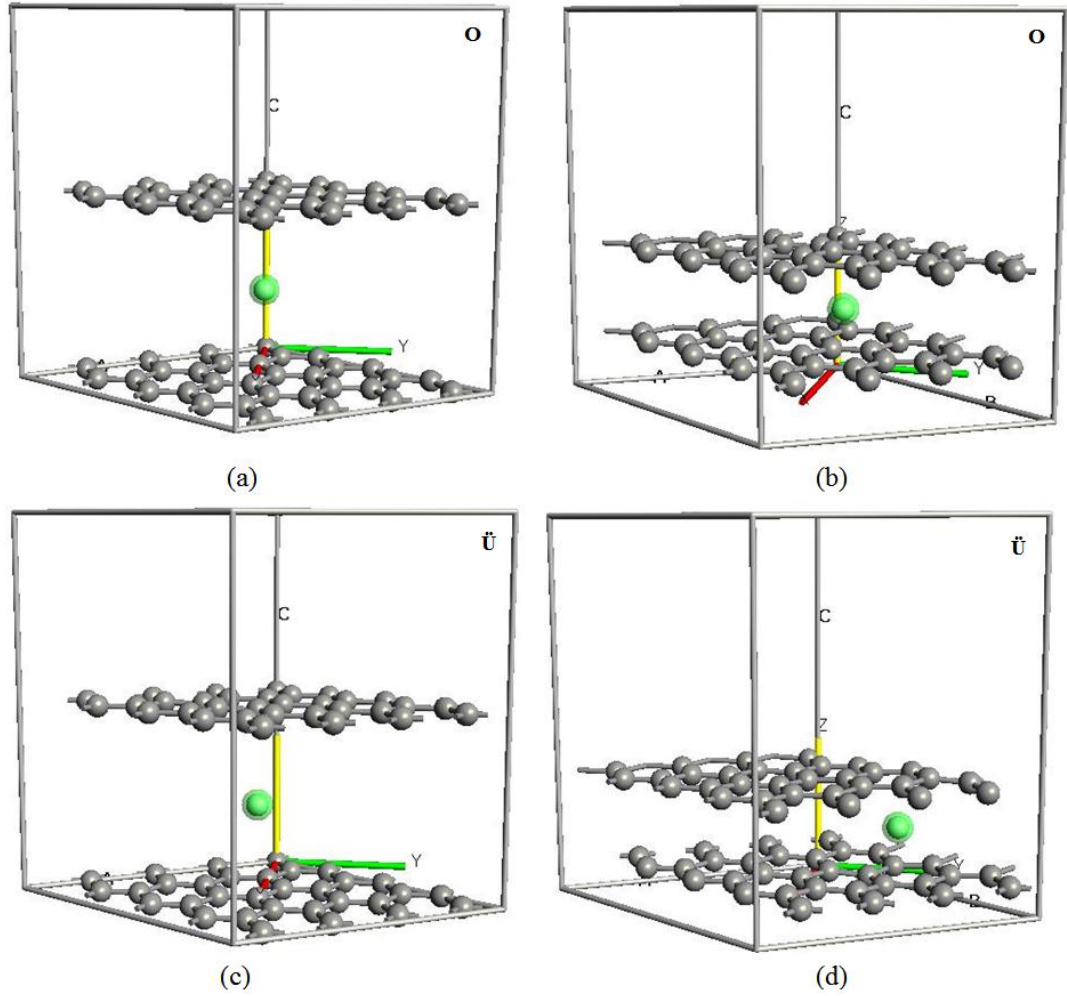
Şekil 4.30. DFT hesaplarında kullanılan yapılar. (a) İki grafen düzlük arası boşken, (b) helyum atomu altıgenin içindeyken, (c) helyum atomu iki atomun ortasındaiken ve (d) helyum atomu alt grafen düzlükteki karbon atomunun üzerindeyken.

Şekil 4.30'da iki grafen düzlük arasına farklı konumlara yerleştirilmiş He atomlarının üstten görünüşü gösterilmiştir. Şekil 4.30 (a)'da gösterilen iki düzlük arası ise He atomlarının etkisini görmek için boş bırakılmıştır. Bu durum, B olarak isimlendirildi. B: İki grafen düzlük arası boş olan durumdur. Şekil 4.30 (b), (c) ve (d) ise He atomlarının yerleştirildiği üç farklı konumu göstermektedir. Bu durumlar ise sırasıyla; İ, O ve Ü olarak isimlendirildi. İ: Helyum atomunun altıgenin içinde olduğu durumdur. O: Helyum atomunun iki atomun ortasında olduğu durumdur. Ü: Helyum atomunun alt grafen düzlükteki karbon atomunun üzerinde olduğu durumdur. Bu üç farklı konumdaki He atomunun grafen tabakalarla etkileşimi gözlenerek, He atomlarının Hall ölçüm sonuçlarına ne gibi etkilerinin olabileceği daha iyi açıklanabilir.



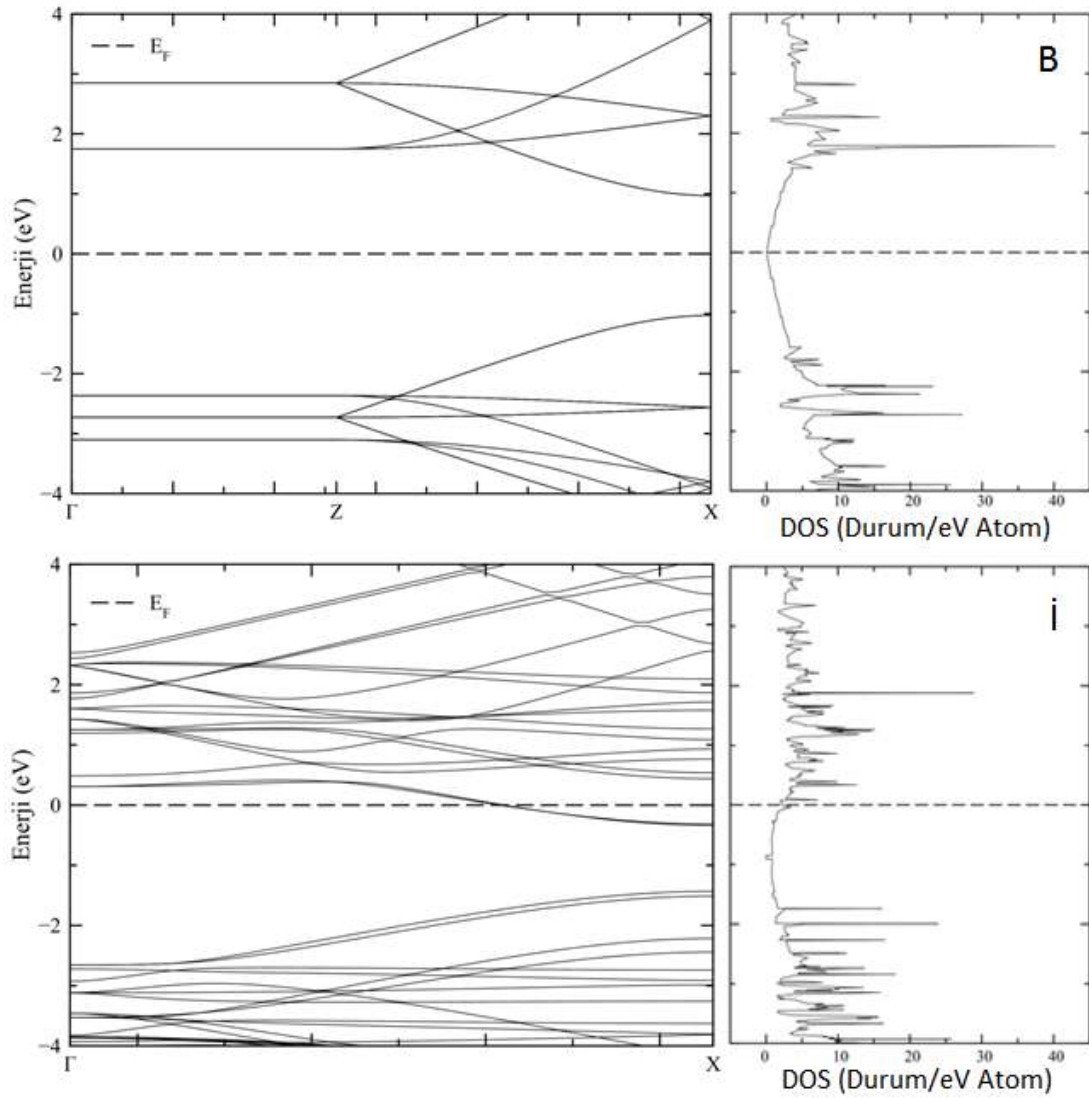
Şekil 4.31. Simülasyon başlamadan önce [(a) ve (c)] ve bittikten sonra [(b), (d)] iki grafen düzlüğün durumlarındaki değişim. B: İki grafen düzlük arası boşken, İ: Helyum atomu altıgenin içindeyken.

Şekil 4.31’de B ve İ durumunda simülasyon başlamadan önce ve sonra iki düzlük arasındaki He’un yandan görünüşü gösterilmiştir. B durumunda, iki grafen düzlük arasında He atomu olmadığı için grafen tabakalarının konumunda bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 4.31 (b)). İ durumunda ise He atomu ilk konumundan biraz uzaklaşmış ve iki grafen tabaka birbirine yaklaşmıştır (Şekil 4.31 (d)).



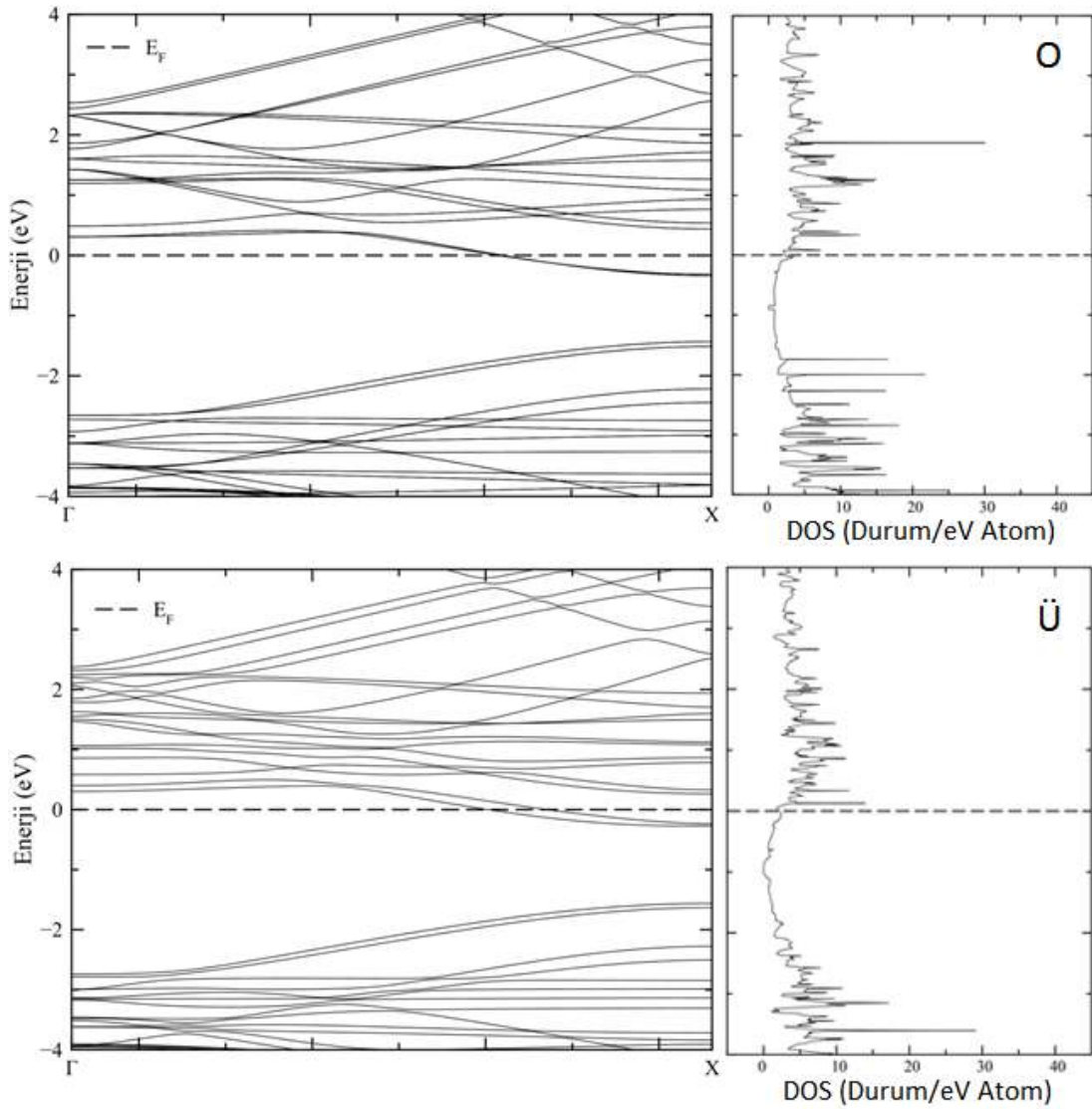
Şekil 4.32. Simülasyon başlamadan önce [(a) ve (c)] ve bittikten sonra [(b), (d)] iki grafen düzlüğün durumlarındaki değişim. O: Helyum atomu iki atomun ortasında iken, Ü: helyum atomu alt grafen düzlükteki karbon atomunun üzerinde iken.

Şekil 4.32’de O ve Ü durumlarında simülasyondan önce ve sonra iki grafen düzlük arasındaki He atomlarının yandan görünüşü gösterilmiştir. O durumunda He atomu bir miktar yer değiştirerek iki grafen tabakasını birbirine yaklaştırmıştır (Şekil 4.32 (b)). Ü durumunda ise He atomu diğer İ ve O durumuna göre daha fazla yer değiştirmiştir fakat üç durumda da (İ, O ve Ü) iki grafen tabakası aynı mesafede birbirine yaklaşmıştır.



Şekil 4.33. Üstte B durumu, altta ise İ durumu için band yapısı ve DOS grafikleri.

Şekil 4.33’de B ve İ durumlarında band yapısı ve DOS grafikleri görülüyor. İki grafen tabakası arasında He atomu yokken band yapısında bir miktar band aralığı olduğu ve DOS grafiğinde Fermi seviyesinde herhangi bir durumun bulunmadığı görülmektedir. İ durumunda He atomunun Grafenin C atomlarıyla etkileşmesi sonucu iletim bandı Fermi seviyesine yaklaşmış ve DOS grafiğinde Fermi seviyesinde çok az ilave durum oluşmuştur.



Şekil 4.34. Üstte O durumu, altta ise Ü durumu için band yapısı ve DOS grafikleri.

Şekil 4.34’de O ve Ü durumlarında band yapısı ve DOS grafikleri görülüyor. O ve Ü durumunda da iletim bandı İ durumunda olduğu gibi Fermi seviyesine yaklaşmaktadır ve DOS grafiğinde Fermi seviyesine yakın konumlarda ilave durumlar oluşmaktadır. Ü durumda DOS grafiğinde oluşan durumların İ ve O durumuna göre çok daha az olduğu görülmektedir.

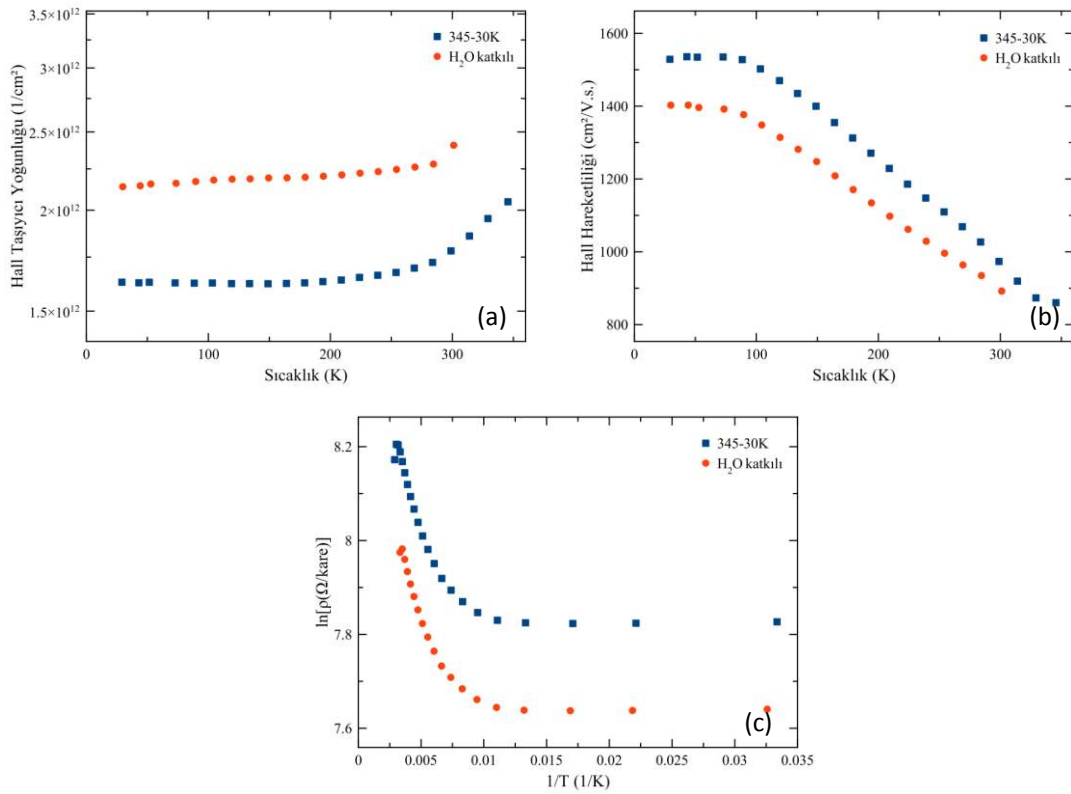
İki grafen tabakası arasına farklı konumlarda yerleştirilen He atomunun DFT hesaplamaları ile elde edilen He’un konumu, band yapısı ve DOS sonuçlarına göre; He atomlarının Hall ölçüm sonuçlarını etkileyebileceği sonucu çıkartılabilir. Daha

önce öngörüldüğü gibi He atomları grafen tabakaları ve grafen/SiC ara yüzeyine sızarak grafen ve SiC alttaşın birbirinden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Grafen tabakaları arasına sızan He atomları grafen tabakalarının birbirine yaklaşmasını sağlarken, grafen tabakalarını da SiC alttaşdan uzaklaştırmaktadır. Bu nedenle, SiC alttaşdan gelen ek taşıyıcılar engellenmekte ve grafenin taşıyıcı yoğunluğunda bir miktar azalma meydana gelmektedir. Her ölçüm sonucunda Grafen tabakası SiC alttaşdan biraz daha uzaklaştığı için taşıyıcı yoğunluğu her ölçüm sonucunda biraz daha azalırken buna bağlı olarak taşıyıcı hareketliliği artmaktadır.

4.8.2. Suyun etkisi

Grafen tabanlı aygıtlarda çevresel koşullar aygıtın çalışma performansını etkileyebilir. H_2O ve O_2 gibi moleküller grafenle reaksiyona girerek aygıt performansını ve güvenilirliğini düşürebilir [89]. Grafen filmlerin su buharı ya da amonyağa maruz bırakılması *p*-tipi ya da *n*-tipi katkılanmalarına yol açar [17]. Ayrıca su moleküllerinin soğurulması kontrol edilebilirse grafenin band aralığı da ayarlanabilir. Katkılanan H_2O moleküllerinin miktarı arttıkça grafenin band aralığında da bir artış meydana gelir [90]. Teorik hesaplamalar ve titreşim spektroskopisi ile su moleküllerinin grafendeki kusurlu bölgeler üzerinde C-H ve C-OH bağları oluşturduğu gösterilmiştir [91, 92].

Suyun (H_2O) epitaksiyel grafenin Hall etkisi ölçümü üzerine olan etkisini görmek için 934 numunesi ilk olarak Hall etkisi sisteminde 345 K'e kadar ısıtıldı ve 345-30 K sıcaklık aralığında ölçüm alındı. 345 K'e kadar ısıtarak epitaksiyel grafen üzerindeki safsızlıkların giderilmesi amaçlandı. Daha sonra epitaksiyel grafen üzerine saf su damlatılarak 300-30 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümü alındı.



Şekil 4.35. 934 kodlu numunenin 345-30 K arasındaki ve su (H₂O) ile katkılandıktan sonraki Hall ölçüm sonuçları. (a) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu. (b) Sıcaklığa bağlı taşıyıcı hareketliliği. (c) Sıcaklık ile öz direncin değişimi.

Şekil 4.35’de katkısız ve su katkılı epitaksiyel grafen numunesi için sırasıyla Hall etkisi ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.35 (a)’da su katkılandıktan sonra taşıyıcı yoğunluğunda önemli bir artış olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi epitaksiyel grafende taşıyıcılar 2DEG’de olduğu gibi sıcaklıktan bağımsızdır fakat yüksek sıcaklıklarda sıcaklığın artmasıyla, SiC’deki safsızlıkların uyarılmasıyla gelen ek taşıyıcılar yüksek sıcaklıklarda taşıyıcı yoğunluğunda artışa neden olmaktadır. Şekil 4.35 (b)’de sıcaklığın düşmesiyle katkılı ve katkısız durumlarda taşıyıcı hareketliliği artarken, 100 K’den düşük sıcaklıklarda hareketlilik sıcaklıktan bağımsız ve safsızlık saçılması ile sınırlandırılmıştır. Su katkılandığında, H₂O moleküllerinden gelen ek taşıyıcılar taşıyıcı yoğunluğunu artırırken safsızlık saçılmaları nedeniyle hareketlilikte azalmaya neden olmaktadır. 100 K’e kadar öz direnç üstel olarak azalırken, 100 K’den düşük sıcaklıklarda safsızlık saçılmasının baskın olması nedeniyle öz direnç sabittir. Su katkılandığında epitaksiyel grafen numunesinin

iletkenliğinin, hareketlilikteki azalmaya rağmen taşıyıcı yoğunluğundaki artış nedeniyle arttığı görölmektedir. 100 K'den yüksek sıcaklıklarda ise her iki durumda da fonon saçılması baskın olduğu için hareketlilik azalmakta fakat su katkılı durumda safsızlık saçılmaları daha etkin olduğu için su katkılı olduğu durumda hareketlilik daha düşük olmaktadır. Hall etkisi sistemindeki ölçümlerde He kullanılması zorunluluğu olduğundan, H₂O katkılı ölçümlerde He katkısının da bulunacağı göz önüne alınmalıdır. Bu bağlamda, H₂O katkılı ölçüm sonuçlarının nicelden ziyade nitel önemi olduğu söylenebilir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmada, grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilmiş grafen numunelerinin yüzey özellikleri ve manyetoiletim özellikleri incelendi. Optik ve elektron-demeti litografi yöntemleri kullanılarak grafen aygıtlar üretildi. Bu grafen aygıtları kullanılarak Hall etkisi ve I-V ölçümleri yapıldı. Işığın, He atomlarının ve suyun grafenin manyetoiletim özellikleri üzerine etkisi Hall ölçümleri alınarak araştırıldı. Grafen ile helyum gazının etkileşimini daha iyi anlamak için DFT hesaplamaları yapıldı.

İlk olarak, grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafen tabakalarının DC-gerilim işlemi ve ısıtma işlemi ile sentezlenmesi anlatıldı. Daha sonra, optik mikroskop altında sentezlenen grafen tabakalar incelendi. SiO₂ yüzeyi üzerindeki grafitik yapıların optik mikroskop altında yerleri belirlendi ve boyutları ölçüldü. Optik mikroskop altında, ısıtma işlemi ile elde edilen grafitik yapıların DC-gerilim işlemiyle elde edilen grafitik yapılara göre daha kaliteli ve SiO₂ yüzeyinin daha temiz olduğu görüldü. Üzerine grafen sentezlenen SiO₂/Si alttaşlar, ultrasonik temizleyici cihazında, izopropil alkol içinde 3 dakika titreştirildiğinde yüzeydeki büyük grafit parçalarının ve bant kalıntılarının büyük oranda temizlendiği görüldü. Daha sonra, SiO₂ yüzeyi üzerindeki grafitik yapılar SEM ile görüntülendi ve optik mikroskop görüntüleriyle karşılaştırıldı. SEM ölçümlerinde SiO₂ ve grafen yüzeyi hakkında daha gerçekçi görüntüler elde edildi. SiO₂ ve grafen yüzeyindeki kusurlar net olarak görüldü.

Grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilen grafenler için AFM ölçümü alındı ve yüzeyleri incelendi. Grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenlerin AFM ölçümlerinde, SiO₂ yüzeyinin eğimli olduğu ve grafen tabakalarının yüzeyleri üzerinde küçük kalıntıların olduğu görüldü. Daha sonra grafen tabakalar için yükselti analizi yapıldı ve grafen tabakaların kalınlıkları ölçüldü. Grafen yüzeyi üzerinde ya da grafen ve alttaş arasında biriken su, azot, oksijen veya argon gibi moleküller, AFM ile grafen kalınlığının 0,34 nm'den daha fazla ölçülmesine neden olduğu için ölçtüğümüz kalınlıklar grafen tabakaların tahmini kalınlıklarını vermektedir. Ölçülen en düşük kalınlık 9 Å (~3 ML) değerindedir. Fakat grafen kalınlığı AFM

ölçümlerindeki olası hata kaynakları nedeniyle gerçek değerinden biraz daha fazla ölçülmüş olabilir.

SiC üzerine epitaksiyel olarak büyütülen grafen tabakalar AFM ile incelendiğinde, grafen tabakalarının yüzeylerinin teraslı yapıya sahip olduğu ve terasların genişliğinin komşu basamakların birleşmesiyle önemli ölçüde artmış olduğu görüldü. Ayrıca, grafen tabakalarının SiC üzerinde geniş alanda şeritler halinde konumlandığı ve 5 μm genişlikte yapılan yükselti analizinde tahmini kalınlığının 2 nm (~ 6 ML) olduğu görüldü.

932 ve 934 epitaksiyel grafen numuneleri için alınan Raman ölçümleri incelendiğinde, grafen numuneleri üzerinde farklı kalınlıklara sahip bölgelerin olduğu görüldü. Raman sonuçlarına göre, 932 numunesinde en yoğun görülen FWHM değeri $45,07\text{ cm}^{-1}$, bu değer bir tabaka grafenin FWHM değerine yakın olduğu için bu numunenin genel olarak 1 tabakadan çok daha kalın olması beklenmemektedir. Ayrıca, 932 numunesinin 1 tabaka ile 4 tabaka arasında değişen kalınlıklara sahip olduğu görülmüştür fakat ağırlıklı olarak 1-2 tabakalı grafen bölgeleri bulunmaktadır. 934 numunesinde en yoğun görülen FWHM değeri ise $54,92\text{ cm}^{-1}$, bu değer dört tabakalı grafenin FWHM değerine yakın olduğu için 934 numunesin genel olarak 4 tabaka kalınlığında olduğu düşünülebilir. Fakat diğer tüm Raman verileri dikkate alındığında 934 numunesinin genel olarak 3-4 tabaka arasında değişen kalınlıklara sahip olduğu görülmüştür.

Optik ve elektron-demeti litografi yöntemleri kullanılarak üretilen grafen aygıtları kullanılarak grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilen grafenler için I-V ölçümleri yapıldı. Grafit soyma ve epitaksiyel yöntemlerle elde edilen grafenlerin her ikisinde ohmik davranış sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca, grafit soyma yöntemi ile elde edilen grafenlerin dirençlerinin epitaksiyel grafenlerin dirençlerine göre çok daha düşük olduğu görülmüştür. Epitaksiyel grafen numunelerinin dirençlerinin yüksek çıkması safsızlık miktarının yüksek olmasından ve tabaka sayısının tek tabaka grafene göre daha fazla olmasından kaynaklanıyor olabilir.

Karanlık ve aydınlık koşullarda epitaksiyel grafen numuneleri için sabit manyetik alan altında, 25-300 K sıcaklık aralığında Hall etkisi ölçümleri yapılarak, ışığın grafenin manyetoiletkenliğine olan etkisi gösterilmiştir. Mavi ışık altında aydınlatılan grafen numunelerinde, 100 K sıcaklık altında uyarılan safsızlıklardan kaynaklanan taşıyıcıların da etkisiyle karanlık koşullara göre çok daha baskın safsızlık saçılması oluşmuştur. 100-200 K sıcaklık aralığında safsızlık saçılmasının etkisi azalmıştır. Bu nedenle aydınlık ölçümde hareketliliğin 200 K'e kadar arttığı görülmüştür. 100 K'den sonra görülen fonon saçılmaları 200 K'den sonra etkisini daha da artırdığı için hareketlilik tekrar azalmaya başlamıştır. 200 K'den sonra ısıtılan SiC ve grafen'deki safsızlıklar taşıyıcı yoğunluğunda parabolik bir artış meydana getirmiştir. 932 ve 934 numunelerinin her ikisi içinde aynı iletim mekanizması gözlenmiştir.

Helyum gazının grafenin Hall etkisi ölçümleri üzerine etkisini görmek amacıyla 923 ve 934 numuneleri için arka arkaya belirli aralıklarla Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Hall ölçümlerinde her iki numunenin taşıyıcı yoğunluğu ilk ölçümden sonra kademeli olarak azalırken hareketlilikleri de kademeli olarak artmıştır. Helyum atomlarının grafen tabakalarla etkileşmesiyle grafenin SiC alttaştan uzaklaştığı ve bu nedenle alttaştan gelen ek taşıyıcıların azaldığı düşünülmektedir. Bunu ispatlamak amacıyla Atomistix ToolKit (ATK) yazılımı kullanılarak DFT hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda iki grafen arasına yerleştirilen bir helyum atomunun iki grafen tabakasını birbirine yaklaştırdığı görüldü. Her ölçüm sonunda grafen tabakalar arasına helyum atomları girdiği için birbirlerine yaklaşan grafen tabakalar SiC alttaştan her ölçüm sonunda biraz daha uzaklaşmış olabilir. Bu nedenle taşıyıcı yoğunluğu her ölçüm sonunda biraz daha azalmış ve buna bağlı olarak hareketlilik artmıştır.

Su moleküllerinin grafenin Hall ölçümlerine etkisini görmek için katkısız ve su katkılı grafen numunesi için Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonucunda su katkılı grafenin katkısız duruma göre taşıyıcı yoğunluğunun arttığı görülmüş, taşıyıcı hareketliliğinin de taşıyıcı yoğunluğundaki ve safsızlık saçılmalarındaki artış nedeniyle arttığı düşünülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Behfar K., Naghdabadi R., "Nanoscale vibrational analysis of a multi-layered graphene sheet embedded in an elastic medium", *Composites Science and Technology*, 65: 1159–1164 (2005).
2. Zhang Q., Lin Z., Chan K. S., "Pure spin current generation in monolayer graphene by quantum pumping", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 24: 075302 (2012).
3. Teh S. L., "The impact of non-covalent interactions on the dispersion of fullerenes and graphene in polymers", PhD, *The University of Tennessee*, (2011).
4. Allen M. J., Tung V. C., and Kaner R. B., "Honeycomb Carbon: A Review of Graphene", *Chemical Reviews*, 110: 132-145 (2010).
5. Barone V., Hod O. and Scuseria G. E., "Electronic Structure and Stability of Semiconducting Graphene Nanoribbons" *Nano Letters*, 6: 2748-2754 (2006).
6. Liang X., Jung, Y.-S., Wu S., Ismach A., Olynick D. L., Cabrini S., Bokor J., "Formation of Bandgap and Subbands in Graphene Nanomeshes with Sub-10 nm Ribbon Width Fabricated via Nanoimprint Lithography", *Nano Letters*, 10: 2454–2460 (2010).
7. Han M. Y., Ozyilmaz B., Zhang Y., and Kim P., "Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons", *Physical Review Letters*, 98: 206805 (2007).
8. Machado B. F., Serp P., "Graphene-based materials for catalysis", *Catalysis Science Technology*, 2: 54–75 (2012).
9. Zhang Y., Tang T.-T., Girit C., Hao Z., Martin C., Zettl A., Crommie M. F., Shen Y. R., Wang F., "Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene", *Nature*, 459: 820-823 (2009).
10. Avouris P., "Graphene: Electronic and Photonic Properties and Devices", *Nano Letters*, 10: 4285–4294 (2010).
11. Ni Z. H., Chen W., Fan X. F., Kuo J. L., Yu T., Wee A. T. S., Shen Z. X., "Raman spectroscopy of epitaxial graphene on a SiC substrate", *Physical Review B*, 77: 115416 (2008).
12. Singh V., Joung D., Zhai L., Das S., Khondaker S. I., Seal S., "Graphene based materials: Past, present and future", *Progress in Materials Science*, 56: 1178 (2011).

13. Shenderova O. A., Zhirnov V. V., Brenner D. W., "Carbon Nanostructures", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 27:3-4, 227-356 (2002).
14. Krishnan A., Dujardin E., Treacy M. M. J., Hugdahl J., Lynam S., Ebbesen T. W., "Graphitic cones and the nucleation of curved carbon surfaces", *Nature*, 388: 451-454 (1997).
15. Land T.A., Michely T., Behm R.J. , J.C. Hemminger, Comsa G., "STM investigation of single layer graphite structures produced on Pt(111) by hydrocarbon decomposition", *Surface Science*, 264: 261–270 (1992).
16. Forbeaux I., Themlin J.M., Debever J.M., "Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC(0001): Interface formation through conduction-band electronic structure", *Physical Review B*, 58: 16396-16406 (1998).
17. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V. and Firsov A. A., "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science*, 306: 666-669, (2004).
18. Yu T., Liang C.-V., Kim C., Yu B., "Local electrical stress-induced doping and formation of monolayer graphene P-N junction", *Applied Physics Letters*, 98: 243105 (2011).
19. Katsnelson M. I., "Graphene: carbon in two dimensions", *Materials Today*, 10: 20-27 (2007).
20. Charlier J.-C., Eklund P. C., Zhu J., Ferrari A. C., "Electron and Phonon Properties of Graphene: Their Relationship with Carbon Nanotubes", *Topics in Applied Physics*, 111: 673–709 (2008).
21. Dubois S.M.-M., Zanolli Z., Declerck X., Charlier J.-C., "Electronic properties and quantum transport in Graphene-based nanostructures", *The European Physical Journal B*, 72: 1-24 (2009).
22. Lehtinen P. O., Foster A. S., Ayuela A., Krasheninnikov A., Nordlund K., Nieminen R. M., "Magnetic Properties and Diffusion of Adatoms on a Graphene Sheet", *Physical Review Letters*, 91: 017202 (2003).
23. Jin C., Lan H., Peng L., Suenaga K., Iijima S., "Deriving Carbon Atomic Chains from Graphene", *Physical Review Letters*, 102: 205501 (2009).
24. Barlas Y., Yang K., MacDonald A.H., "Quantum Hall effects in graphene-based two-dimensional electron systems", *Nanotechnology* 23: 052001 (2012).

25. Wang M.C, Yan C., Ma L., Hu N., Chen M.W. "Effect of defects on fracture strength of graphene sheets", *Computational Materials Science* 54: 236-239 (2012).
26. Owens F. J., "Electronic and magnetic properties of armchair and zigzag graphene nanoribbons", *Journal of Chemical Physics*, 128: 194701 (2008).
27. Wallace P. R. "The band theory of graphite.", *Physical Review*, 71: 622–634 (1947).
28. Yang X., Liu G., Balandin A. A., and Mohanram K., "Triple-Mode SingleTransistor Graphene Amplifier and Its Applications", *ACS Nano*, 4: 5532 (2010).
29. Wang H., Hsu A., Wu J., Kong J., Palacios T., "Graphene-Based Ambipolar RF Mixers", *IEEE Electron Device Letters*, 31: 906 (2010).
30. Cho S., Fuhrer M. S., "Charge transport and inhomogeneity near the minimum conductivity point in graphene", *Physical Review B*, 77: 081402 (2008).
31. Rozploch F., Patyk J., Stankowski J., "Graphenes Bonding Forces in Graphite", *Acta Physica Polonica A*, 112: 557 (2007).
32. Gao Y., Hao P., "Mechanical properties of monolayer graphene under tensile and compressive loading", *Physica E*, 41: 1561–1566 (2009).
33. Dragoman D., Dragoman M., Müller A. A., "Graphene-A One-Atom-Thick Material for Microwave Devices", *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 11: 29-35 (2008).
34. Geim A. K. "Graphene: Status and Prospects", *Science*, 324: 1530 (2009).
35. Bao B. Q., Zhang H., Wang Y., Ni Z., Yan Y., Shen Z. X., Loh K. P., and Tang D. Y., "Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers", *Advanced Functional Materials*, 19: 3077 (2009).
36. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Booth T. J., Stauber T., Peres N. M. R., Geim A. K., "Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene", *Science*, 320: 1308 (2008).
37. Chhowalla M., Teo K.B.K., Ducati C., Rupesinghe N.L., Amaratunga G.A.J., Ferrari A.C., Roy D., Robertson J., and Milne W.I., "Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition", *Journal of Applied Physics*, 90: 5308 (2001).

38. Yan H., Xia F., Zhu W., Freitag M., Dimitrakopoulos C., Bol A. A., Tulevski G., and Avouris P., "Infrared Spectroscopy of Wafer-Scale Graphene", *ACS Nano*, 5: 9854 (2011).
39. Jung I., Pelton M., Piner R., Dikin D. A., Stankovich S., Watcharotone S., Hausner M., and Ruoff R. S., "Simple approach for high-contrast optical imaging and characterization of graphene-based sheets", *Nano Letters*, 7: 3569 (2007).
40. Liang X., Chang A.S., Zhang Y., Harteneck B.D., Choo H., Olynick D.L., Cabrini S., "Electrostatic Force Assisted Exfoliation of Prepatterned Few-Layer Graphenes into Device Sites" *Nano Letters*, 9 (1): 467–472 (2009).
41. Blakea P., Hill E. W., Neto A. H. C., Novoselov K. S., Jiang D., Yang R., Booth T. J., and Geim A. K. , "Making graphene visible" *Applied Physics Letters*, 91: 063124 (2007).
42. Haomin W., " Growth and characterization of two-dimensional carbon nanostructures ", Doktora, *National University of Singapore*, Singapore, 85-86 (2009).
43. Emtsev K. V., Bostwick A., Horn K., Jobst J., Kellogg G. L., Ley L., McChesney J. L., Ohta T., Reshanov S. A., Röhl J., Rotenberg E., Schmid A. K., Waldmann D., Weber H. B., Seyller T., "Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide", *Nature Materials*, 8: 203 (2009).
44. Heer W. A., Berger C., Wu X., First P. N., Conrad E. H., Li X., Li T., Sprinkle M., Hass J., Sadowski M. L., Potemski M., Martinez G., "Epitaxial graphene", *Solid State Communications*, 143: 92 (2007).
45. Strupiński W., Drabińska A., Bożek R., Borysiuk J., Wysmolek A., Stepniewski R., Kościwicz K., Caban P., Korona K., Grodecki K., Geslin P.A., Baranowski J. M., "Growth Rate and Thickness Uniformity of Epitaxial Graphene", *Materials Science Forum*, 569: 645-648 (2010).
46. Borysiuk J., Sołtys J., Bożek R., Piechota J., Krukowski S., Strupinski W., Baranowski J. M., Stepniewski R., "Role of structure of C-terminated 4H-SiC(000⁻¹) surface in growth of graphene layers: Transmission electron microscopy and density functional theory studies", *Physical Review B*, 85: 045426 (2012).
47. Rothschild M., Bloomstein T. M., Fedynyshyn T. H., Kunz R. R., Liberman V., Switkes M., Efremow N. N., Palmacci S. T., Sedlacek J. H. C., Hardy D. E., and Grenville A., "Recent Trends in Optical Lithography", *Lincoln Laboratory Journal*, 14: 221 (2003).

48. Timothy A. Brunner, "Why optical lithography will live forever", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 21: 2632, (2003).
49. David K. Lam, Enden D. Liu, Michael C. Smayling, Ted Prescop, "E-Beam to Complement Optical Lithography for 1D Layouts", *Proc. SPIE 7970*, 797011 (2011).
50. Sze S. M., "Semiconductor Devices: Physics and Technology, 2nd Edition", *Argosy Publishing Services*, USA, 404-431 (2001).
51. Jeon S. C., Kim Y. S., Lee D. K., "Fabrication of a Graphene Nanoribbon with Electron Beam Lithography Using a XR-1541/PMMA Lift-Off Process", *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 11: 190-193, (2010).
52. Graf D., Molitor F., Ensslin K., Stampfer C., Jungen A., Hierold C., Wirtz L., "Spatially Resolved Raman Spectroscopy of Single- and Few-Layer Graphene" *Nano Letters*, 7: 238-242 (2007).
53. Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., Casiraghi C., Lazzeri M., Mauri F., Piscanec S., Jiang D., Novoselov K.S., Roth S., and Geim A.K. "Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers" *Physical Review Letters* 97: 187401 (2006).
54. Zabel J., Nair R. R., Ott A., Georgiou T., Geim A. K., Novoselov K. S., Casiraghi C., "Raman Spectroscopy of Graphene and Bilayer under Biaxial Strain: Bubbles and Balloons", *Nano Letters*, 12: 617 (2012).
55. Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch., "Atomic Force Microscope", *Physical Review Letters*, 56: 930–933 (1986).
56. Dupas C., Houdy P., Lahmani M., "Nanoscience: Nanotechnologies and Nanophysics", *Springer*, Heidelberg, 91-118 (2004).
57. Mongillo J. F., "Nanotechnology 101 (Science 101)", *Greenwood Press*, London, 55-61 (2007).
58. Egerton R. F., "Physical principles of electron microscopy : an introduction to TEM, SEM, and AEM", *Springer*, USA, 125-151 (2005).
59. Lişesivdin S. B., " Electron and Magneto Transport Properties of AlGaIn/GaN Based High Electron Mobility Transistors (HEMT)", Doktora, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2008).
60. Tian J. F., Jauregui L. A., Lopez G., Cao H., and Chen Y.P., "Ambipolar graphene field effect transistors by local metal side gates" *Applied Physics Letters*, 96: 263110 (2010).

61. Checkelsky J. G., Ong N. P., "Divergent resistance at the Dirac point in graphene: Evidence for a transition in a high magnetic field" *Physical Review B*, 79: 115434 (2009).
62. Trogisch S., Simpson M. J., Taub H., Volkmann U. G., Pino M., Hansen F. Y., "Atomic force microscopy measurements of topography and friction on dotriacontane films adsorbed on a SiO₂ surface", *The Journal of chemical physics*, 123: 154703 (2005).
63. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H.L., "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene", *Solid State Communications* 146: 351–355 (2008).
64. Seol J. H., Moore A. L., Jo I., Yao Z., Shi L., "Thermal Conductivity Measurement of Graphene Exfoliated on Silicon Dioxide", *Journal of Heat Transfer*, 133: 022403 (2011).
65. Incze P. N., Osvath Z., Kamaras K., Biro L. P., "Anomalies in thickness measurements of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy", *Carbon*, 46: 1435 (2008).
66. Ishigami M., Chen J.H., Cullen W.G., Fuhrer M.S., Williams E.D., "Atomic Structure of Graphene on SiO₂", *Nano Letters*, 7: 1643 (2007).
67. Gordillo M. C., Marti J., "Water on graphene surfaces", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 22: 284111 (2010).
68. Pantelic R. S., Suk J. W., Magnuson C. W., Meyer J. C., Wachsmuth P., Kaiser U., Ruoff R. S., Stahlberg H., "Graphene: Substrate preparation and introduction", *Journal of Structural Biology*, 174: 2234 (2011).
69. Tombros N., Veligura A., Junesch J., Van den Berg J. J., Zomer P. J., Wojtaszek M., Marun I. J. V., Jonkman H. T., Van Wees B. J., "Large yield production of high mobility freely suspended graphene electronic devices on a polydimethylglutarimide based organic polymer", *Journal of Applied Physics*, 109: 093702 (2011).
70. Adam S., Sarma S. D., "Transport in suspended graphene", *Solid State Communications*, 146: 356 (2008).
71. Dimitrakopoulos C., Lin Y.-M., Grill A., Farmer D. B., Freitag M., Sun Y., Han S.-J., Chen Z., Jenkins K. A., Zhu Y., Liu Z., McArdle T. J., Ott J. A., Wisnieff R., Avouris P., "Wafer-scale epitaxial graphene growth on the Si-face of hexagonal SiC (0001) for high frequency transistors", *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 28: 985 (2010).

72. Dhar S., Barman A. R., Ni G. X., Wang X., Xu X. F., Zheng Y., Tripathy S., Ariando, Rusydi A., Loh K. P., Rubhausen M., Neto, A. H. C., Ozyilmaz B., Venkatesan T., "A new route to graphene layers by selective laser ablation", *AIP Advances*, 1: 022109 (2011).
73. Avouris P. and Dimitrakopoulos C., "Graphene: synthesis and applications", *Materials Today*, 15: 86 (2012).
74. Emtsev K. V., Bostwick A., Horn K., Jobst J., Kellogg G. L., Ley L., McChesney J. L., Ohta T., Reshanov S. A., Rohrl J., Rotenberg E., Schmid A. K., Waldmann D., Weber H. B., Seyller T., "Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide", *Nature Materials*, 8: 203 (2009).
75. Dimitrakopoulos C., Grill A., McArdle T. J., Liu Z., Wisnieff R., Antoniadis D. A., "Effect of SiC wafer miscut angle on the morphology and Hall mobility of epitaxially grown graphene", *Applied Physics Letters*, 98: 222105 (2011).
76. Wang D.-C., Zhang Y.-M., Zhang Y.-M., Lei T.-M., Guo H., Wang Y.-H., Tang X.-Y., Wang H., "Raman analysis of epitaxial graphene grown on 4H SiC (0001) substrate under low pressure condition", *Chinese Physics B*, 20: 128101 (2011).
77. Schmidt D. A., Ohta T., Beechem T. E., "Strain and charge carrier coupling in epitaxial graphene", *Physical Review B*, 84: 235422 (2011).
78. Li C., Li D., Yang J., Zeng X., and Yuan W., "Preparation of Single- and Few-Layer Graphene Sheets Using Co Deposition on SiC Substrate, *Journal of Nanomaterials*, 2011: 319624 (2011).
79. Röhrl J., Hundhausen M., Emtsev K. V., Seyller Th., Graupner R., and Ley L., "Raman spectra of epitaxial graphene on SiC(0001)", *Applied Physics Letters*, 92: 201918 (2008).
80. Venugopal A., Colombo L., and Voge E. M., "Contact resistance in few and multilayer graphene devices", *Applied Physics Letters*, 96: 013512(2010).
81. Nouchi R., Shiraishi M., and Suzuki Y., "Transfer characteristics in graphene field-effect transistors with Co contacts", *Applied Physics Letters*, 93: 152104 (2008).
82. Wang F., Zhang Y., Tian C., Girit C., Zettl A., Crommie M., Shen Y. R., "Gate-Variable Optical Transitions in Graphene", *Science*, 320: 206 (2008).
83. Takahashi J., Ohtani N., Katsuno M., Shinoyama S., "Sublimation growth of 6H- and 4H-SiC single crystals in the [1100] and [1120] directions", *Journal of Crystal Growth*, 181: 229 (1997).

84. Astrath N.G.C., Bento A.C., Baesso M.L., Ferreira da Silva A., Persson C., "Photoacoustic spectroscopy to determine the optical properties of thin film 4H-SiC", *Thin Solid Films*, 515: 2821 (2006).
85. Ding J.-L., Wang Y.-C., Zhou H., Chen Q., Qian S.-X., Feng Z.-C., Lu W.-J., "Nonlinear Optical Properties and Ultrafast Dynamics of Undoped and Doped Bulk SiC", *Chinese Physics Letters*, 27: 124202 (2010).
86. Lisesivdin S. B., Arslan E., Kasap M., Ozcelik S., and Ozbay E., "Self-consistent scattering analysis of $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{AlN}$ heterostructures grown on 6H-SiC substrates using photo-Hall effect measurements", *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20: 045208 (2008).
87. Nair R. R., Wu H. A., Jayaram P. N., Grigorieva I. V., Geim A. K., "Unimpeded Permeation of Water Through Helium-Leak-Tight Graphene-Based Membranes", *Science*, 335: 442 (2012).
88. Reatto L., Nava M., Galli D. E., Billman C., Sofo J. O., and Cole M. W., "Novel substrates for Helium adsorption: Graphane and Graphene-Fluoride", *arXiv:1204.3061* (April 2012).
89. Feng X., Maier S., and Salmeron M., "Water Splits Epitaxial Graphene and Intercalates", *Journal of the American Chemical Society*, 134: 5662 (2012).
90. Yavari F., Kritzinger C., Gaire C., Song L., Gullapalli H., Borca-Tasciuc T., Ajayan P. M., Koratkar N., "Tunable Bandgap in Graphene by the Controlled Adsorption of Water Molecules", *Small*, 6: 2535–2538 (2010).
91. Kostov M. K., Santiso E. E., George A. M., Gubbins K. E., Nardelli M. B., "Dissociation of water on defective carbon substrates", *Physical Review Letters*, 95: 136105 (2005).
92. Politano A., Marino A. R., Formoso V., Chiarello G., "Water adsorption on graphene/Pt(111) at room temperature: A vibrational investigation", *AIP Advances*, 1: 042130 (2011).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı Adı : ELİBOL Kenan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.03.1988 Tokat
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (554) 9493134
 e-mail : kenanelibol@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	2010

Yabancı Dil

İngilizce

Tez Dışı Yayınlar

SCI-indexli makaleler

Atmaca G., Elibol K., Lisesivdin S. B., Kasap M., Ozbay E., "Numerical optimization of Al-mole fractions and layer thicknesses in normally-on AlGa_N-Ga_N double-channel high electron mobility transistors (DCHEMTs)" *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 11, 578 (2009).

Tasli P., Sarikavak B., Atmaca G., Elibol K., Kuloglu A. F. and Lisesivdin S. B., "Numerical Simulation of Novel Ultrathin Barrier n-GaN/InAlN/AlN/GaN HEMT Structures: Effect of In Mole Fraction, Doping and Layer Thicknesses" *Physica B* 405, 4020 (2010).

Bildiriler

Elibol K., Atmaca G., Lişesivdin S. B., Kasap M., Özçelik S., "Optimization of Al-mole Fraction and Layer Thicknesses in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ Double Channel HEMT Structures" *Turkish Physical Society XXV. International Conference*, p454 (2008).

Atmaca G., Elibol K., Tasli P., Lisesivdin S. B., Kasap M., "Cift kanalli $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ tabanlı p-HEMT Yapılarında 1 ve 2-boyutta Schrödinger-Poisson Cozumleri ve Akim-Gerilim Incelemeleri" *XVI. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P59 (2009).

Elibol K., Atmaca G., Tasli P., Lişesivdin S. B., Kasap M., "Optimization and Device Characteristics of The $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ Based HEMTs with InGaIn Back Barriers" *Turkish Physical Society XXVII. International Conference*, p621 (2010).

Atmaca G., Elibol K., Tasli P., Lisesivdin S.B. and Kasap M., "Numerical Investigation of Two Dimensional Electron Gas $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ Double Barrier HEMTs" *Turkish Physical Society XXVII. International Conference*, p591 (2010).

Elibol K., Atmaca G., Taşlı P., Lişesivdin S. B. and Kasap M., "GaIn Tabanlı MESFET Yapıların 2-boyutta Elektriksel Karakteristikleri" *XVII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P34 (2010).

Atmaca G., Elibol K., Taşlı P., Lişesivdin S. B. and Kasap M., "Eklem Alan Etkili Transistörlerin Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi" *XVII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, S12 (2010).

Kartaloğlu O., Atmaca G., Elibol K. and Lişesivdin S. B., "Erbiyum Katkılı Eklem Diyotun I-V Karakteristiği" *XVII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P46 (2010).

Elibol K., Kelekçi Ö., Atmaca G., Lişesivdin S. B., Kasap M., Özçelik S. and Özbay E. "Development of Graphene Flake Production Methods" *XVII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, S2 (2010).

Atmaca G., Elibol K., Tasli P., Lisesivdin S.B., "Effects On Two Dimensional Electron Gas Of InGaN Back-Barrier For Ultrathin Barrier AlN/GaN High Electron Mobility Transistors" *VII. Nanoscience and Nanotechnology Conference*, p3 E. 11 (2011).

Elibol K., Gunes C., Kuloglu A. F., Boyali E., Lisesivdin S.B., "A Numerical Study on Effects of InAlN/AlGaIn Barrier in InAlN/AlGaIn/AlN/GaN based High Electron Mobility Transistors" *Turkish Physical Society XXVIII. International Conference*, p711 (2011).

Atmaca G., Elibol K., Karakoç G., Güneş C. and Lişesivdin S.B., "Tek kanal ve çift kanal InGaIn/InN çokluyapıların kıyaslanması" *XVIII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P64 (2011).

Elibol K., Atmaca G., Kelekçi O., Tasli P., Özbay E., Lisesivdin S.B., "Self-consistent Transport Properties of Graphene Sheets" *Turkish Physical Society XXVIII. International Conference*, p710 (2011).

Elibol K., Atmaca G., Özbay E. And Lişesivdin S.B. "Tek ve çift tabakalı grafen alan etkili transistörlerin (GFET) akım-gerilim (I/V) performansı" *XVIII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P66 (2011).

Elibol K., Atmaca G., Bütün S., Lişesivdin S.B. and Özbay E., "Epitaksiyel grafende Hall ve zayıf antilokalizasyon ölçümleri" *XVIII. Solid State Matter Physics Ankara Meeting*, P67 (2011).

Seminerler

“GaN tabanlı Çift Kanallı Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörlerin (DC-HEMTs) Eniyileştirilmesi” Semiconductor Technologies Advanced Research Laboratory, Department of Physics, Gaz University, Ankara, Turkey, Feb 25th, 2009.

“Düşük boyutlu sistemler, karbon nano yapılar, biyolojik sensörler” Türkiye Biyomühendislik Zirvesi ve IX. Biyomühendislik Günleri, Department of Bioengineering, Ege University, İzmir, Turkey, Apr 21th, 2012.

Hobiler

Araştırma, Popüler bilim dergisi yazarlığı.