

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**GRAFEN TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Muhittin ÖZTÜRK

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hidayet ÇETİN**

Yozgat 2011

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**GRAFEN TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

Muhittin ÖZTÜRK

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hidayet ÇETİN**

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 108T930 nolu proje ile desteklenmiştir.

Yozgat 2011



T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Fizik Anabilim Dalı 7011050016 numaralı öğrencisi Muhittin ÖZTÜRK'ün hazırladığı “**Grafen Transistörlerin Elektriksel Parametrelerinin Belirlenmesi**” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 16/11/2011 Çarşamba günü saat 10:30'da yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şeref OKUDUCU

Üye : Prof. Dr. Recep ŞAHİNGÖZ

Üye : Doç. Dr. Hidayet ÇETİN (Danışman)

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 01/12/2011 tarih ve 13. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

01/12/2011

Enstitü Müdürü
(Ünvanı, Adı Soyadı)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	
2. GRAFENİN BANT YAPISI VE ÖZELLİKLERİ	
2.1. Grafenin Bant yapısı	12
2.2. Grafenin Elektriksel Özellikleri	14
2.3. Grafenin Optik Özellikleri.....	21
2.4. Grafenin Mekaniksel Özellikleri.....	23
2.5. Grafenin Termal Özellikleri.....	24
3. GRAFEN SENTEZLEME TEKNİKLERİ VE YÖNTEMLER	
3.1. Mekanik Ayrılma Yöntemi.....	25
3.2. Alt Tabaka Temelli Metotlar	26
3.3. Çözücü İçerisinde Grafenoksitin İndirgenmesi.....	27
3.4. Seçilen Çözücü İçerisinde Grafenin Üretimi.....	30
3.5. Raman Spektroskopisi.....	33
3.6. Litografi.....	35
3.7. Termal Buharlaştırma Sistemi.....	36
3.8. Hesaplamalar.....	37
3.8.1. Mobilite Hesabı.....	37
4. DENEYSEL KISIM	
4.1. Numunenin Hazırlanması.....	41
4.2. Elektriksel Ölçüm	44
5. SONUÇ	65
6. KAYNAKLAR.....	72
7. ÖZGEÇMİŞ.....	79

GRAFEN TRANSİSTÖRLERİN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Muhittin ÖZTÜRK

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2011; Sayfa: 79

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hidayet ÇETİN

ÖZET

Grafen, bal peteği örgüsü şeklinde sıkıca paketlenmiş karbon atomlarının düz tek tabakası olarak tanımlanmaktadır. Bu sıkıca bağlı iki boyutlu madde, birçok uygulamalarda heyecan uyandıran yüksek sağlamlık, üstün termal ve elektriksel iletkenlik gibi olağanüstü özellikler sergiler. Tek tabaka grafenler, 285 nm termal oksitli silisyum alttaş üzerine mekanik ayrılma metoduyla hazırlanır. Bu tek tabaka grafenler optik mikroskobu ve daha sonra Raman Spektroskopisiyle karakterize edilir. Sonra elektriksel ölçümler yapmak için, alttaş olarak silisyum kullanılarak grafen tabakalar üzerine grafen alan etkili transistor üretilir. Bu çalışmanın asıl amacı; atmosfer, vakum, nem altında ve farklı sıcaklık değerlerinde grafenin elektriksel parametrelerini incelemektir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, Alan etkili Transistör, Raman Spektroskopisi, Elektriksel Karakteristik, Vakum, Nem, Sıcaklık.

THE DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF THE GRAPHENE TRANSISTORS

Muhittin ÖZTÜRK

**Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Master of Science Thesis**

2011; Page: 79

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hidayet ÇETİN

ABSTRACT

Graphene is defined as flat monolayer of carbon atoms tightly packed into a honeycomb lattice. This strictly two-dimensional (2D) material exhibits a range of unusual properties, such as excellent electrical and thermal conductivities and extremely high strength, which hold great promise in many applications. Mechanical exfoliated single layer graphene sheets are transferred on silicon wafer which have 285 nm thermal oxide. These single graphene layers are characterized by optical microscopy and then Raman Spectroscopy. In order to measure electrical characteristics, graphene field effect transistor is fabricated on the graphene sheet by using the silicon substrate as backgate. The main objectives of this study are to explore electrical parameters of the graphene under the atmosphere, vacuum, humidity and different temperature.

Keywords: Graphene, Field Effect Transistor (FET), Raman Spectroscopy, Electrical Characteristic, Vacuum, Humidity, Temperature.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanmasında emek ve yardımlarını esirgemeyen ve çalışmalarım süresince değerli fikir ve tecrübeleri ile bana büyük destek sağlayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hidayet ÇETİN'e içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında birçok konuda yardımlarını gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Arş. Gör. Behiye BOYARBAY'a ve Abdulllah AKKAYA' ya teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ile maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen aileme en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Muhittin ÖZTÜRK
KASIM 2011

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1: Santrifüj sonrası kalan Grafen/Grafit yüzdesi ve yüzey gerilimine göre en iyi çözücüler.....	33
Tablo 4.1: Grafen numunenin atmosfer ortamındaki farklı V_{DS} değerleri için hol ve elektron mobiliteleri.....	51
Tablo 4.2: Grafen numunenin farklı vakum değerleri altında hol ve elektron mobilitesi.....	53
Tablo 4.3: Grafen numunenin farklı vakum değerleri altında hol ve elektron mobilitesi.....	57
Tablo 4.4: Grafen numunenin farklı nem değerler altında elektron ve hol mobilitesi.....	60
Tablo 4.5: Grafen numunenin farklı sıcaklık değerleri için mobilite değerleri	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 : Grafen tek tabakanın şematik görüntüsü.....	12
Şekil 2.2 : Grafen ve onun ters örgüsü. Solda: $\mathbf{a}_1$ ve $\mathbf{a}_2$ örgü vektörleridir. Her bir birim hücre içerisinde iki tane karbon atomu vardır. Birim hücre koyu alandır. Sağda: grafenin ters örgü vektörleri $\mathbf{b}_1$ ve $\mathbf{b}_2$ ile belirlenmiştir. Birinci Brillouin bölgesi koyu bölge olarak gösterilmiştir.....	13
Şekil 2.3: Grafenin bağ yapısının şematik görüntüsü	14
Şekil 2.4: Grafen tabakadan 0D fulloren, 1D karbon nanotüp ve 3D grafitin oluşması	15
Şekil 2.5 : Grafenin FET şeması	16
Şekil 2.6 : İletkenliğin kapı gerilimine göre değişimi	17
Şekil 2.7 : Üç farklı sıcaklıkta elektrik alan etkisi (5K, 70K ve 300K deki alan etkisi)	17
Şekil 2.8 : Uygulanan kapı gerilimine bağlı olarak grafenin akım-gerilim karakteristiği.....	18
Şekil 2.9 : Kuantum Hall etkisi	19
Şekil 2.10: Si/SiO ₂ alttaşı üzerindeki grafen tabakadan ışığın yansımaları.....	21
Şekil 2.11: Farklı tabaka sayılarına sahip grafenin optik görüntüsü.....	22
Şekil 3.1: Grafenoksitin kimyasal yapısı.....	28
Şekil 3.2: Termal işleminden geçirilmiş grafenoksit.....	28
Şekil 3.3: Grafenoksit için 3 boyutlu model.....	29
Şekil 3.4: a) Sıvı içerisinde dağılmış grafenoksit. b) Sıvı içerisinde dağılmış grafen. c) %5 HCl eklendikten sonra grafen tozları. d) Grafen tozların yeniden su içerisinde dağılması	31
Şekil 3.5: a) Grafit ve tek tabaka grafenin Raman spektrumlarının karşılaştırılması. (b) 514nm dalga boyu için tabaka sayısının bir fonksiyonu olarak 2D bandındaki değişimler. (c) 633nm dalga boyu için tabaka sayısının bir fonksiyonu olarak 2D bandındaki	

	değişimler. (d) Grafit ve tek tabaka grafenin 514nm dalga boyundaki D bandının karşılaştırılması ve grafit için D bandı iki kısma (D_1 ve D_2) ayrılırken. e) İki tabaka grafen için D bandı dört kısma ayrılması.....	34
Şekil 3.6:	Buharlaştırma sisteminin şematik çizimi.....	36
Şekil 3.7:	Grafen numunenin optik görüntüsü.....	40
Şekil 4.1:	SiO_2/Si tabaka üzerine grafenin iletimi.....	41
Şekil 4.2:	Optik mikroskobun 100X merceği altında HOPG den elde edilen grafenin görüntüsü.....	42
Şekil 4.3:	Optik mikroskobun 100X merceği altında Kish grafitten elde edilen grafenin görüntüsü.....	43
Şekil 4.4:	Grafen numunenin litografi işlemi yapıldıktan sonraki optik görüntüsü.....	43
Şekil 4.5:	Elektriksel kontakları alınmış grafen numunenin görüntüsü.....	44
Şekil 4.6:	Grafen sensör ölçümü için bağlantıların görüntüsü.....	45
Şekil 4.7:	Elektriksel kontak alınmış grafen numunenin optik mikroskob altındaki görüntüleri.....	45
Şekil 4.8:	Grafen numunenin Raman Spektrumu.....	46
Şekil 4.9:	Grafen numunenin atmosfer ortamındaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	47
Şekil 4.10:	Grafen numunenin atmosfer ortamındaki taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği.....	47
Şekil 4.11:	Grafen numunenin atmosfer altındaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	48
Şekil 4.12:	Grafen numunenin atmosfer ortamında taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği.....	49
Şekil 4.13:	Grafen numunenin optik mikroskob altındaki görüntüsü.....	50
Şekil 4.14:	Grafen numunenin atmosfer ortamındaki $I_{ds}-V_g$ grafiği.....	50
Şekil 4.15:	Grafen numunenin atmosfer ortamındaki farklı V_{ds} değerleri için $\rho-V_g$ grafiği.....	51
Şekil 4.16:	Grafen numunenin optik mikroskob altındaki görüntüsü.....	52
Şekil 4.17:	Grafen numunenin atmosfer ve vakum ortamı altındaki $I_{ds}-V_g$ grafiği.....	52
Şekil 4.18:	Grafen numunenin atmosfer ve vakum ortamında $\rho -V_g$ grafiği.....	53

Şekil 4.19:	Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.....	54
Şekil 4.20:	Grafen numunenin $2,8 \times 10^{-2}$ mbar vakum altındaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği...	55
Şekil 4.21:	Grafen numunenin farklı vakum değerleri altındaki $I_{ds}-V_g$ grafiği...	56
Şekil 4.22:	Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.....	57
Şekil 4.23:	Neme bağlı ölçüm alınan grafen numunenin Raman Spektrumu....	57
Şekil 4.24:	Grafen numunenin % 75 nem altındaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	58
Şekil 4.25:	Grafen numunenin 3×10^{-3} mbar vakum altındaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	59
Şekil 4.26:	Grafen numunenin nem ve vakum altındaki $I_{ds}-V_g$ grafiği.....	59
Şekil 4.27:	Grafen numunenin nem ve vakum altındaki $\rho-V_g$ grafiği.....	61
Şekil 4.28:	Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.....	61
Şekil 4.29:	Grafen numunenin $-175^{\circ}C$ sıcaklıktaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	62
Şekil 4.30:	Grafen numunenin $22^{\circ}C$ sıcaklıktaki $I_{ds}-V_{ds}$ grafiği.....	62
Şekil 4.31:	Grafen numunenin farklı sıcaklık değerlerinde $I_{ds}-V_g$ grafiği.....	63
Şekil 4.32:	Grafen numunenin sıcaklık- mobilite grafiği.....	64

KISALTMALAR LİSTESİ

AFM	:	Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscopy)
AZ726MIF	:	Tetrametil amonyum hidroksil çözeltisi
Cd	:	Kadmiyum
Co	:	Kobalt
Cu	:	Bakır
C ₂ H ₅ OH	:	Etil Alkol
CVD	:	Kimyasal Buhar Depolama (Chemical Vapor Deposition)
DMA	:	N, N-Dimetilasetamit
DMF	:	N, N-Dimetilformamit
DMSO	:	Dimetilsülfoksit
FET	:	Alan Etkili Transistör (Field Effect Transistor)
GO	:	Grafenoksit
H ₂	:	Hidrojen
H ₂ O ₄	:	Sülfirik Asit
HCL	:	Hidrojen Klorür
HMTA	:	Hekzametilentetramin
HOPG	:	Yüksek yönelimli pirolitik grafit
Ir	:	İridyum
IPA	:	İsopropanal
KHE	:	Kuantum Hall etkisi
KMnO ₄	:	Potasyum Permanganat
MOSFET	:	Metal-oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
NiFe	:	Nikel-Demir
N ₂	:	Azot
NMP	:	1-Metil-2-prolidon
NO ₂	:	Azotoksit

N12P	:	1-Dodesil-2-prolidon
NVP	:	1-Vinil-2-prolidon
O ₂	:	Oksijen
Pb	:	Kurşun
PDMS	:	Polidimetilsiloksan
Pt	:	Platin
RS	:	Raman Spektroskopisi
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	:	Silisyum
SiO ₂	:	Silisyum Oksit
SiC	:	Silisyum Karbür
TBA	:	Tetrametilamonyum
UV	:	Ultraviole

1. GİRİŞ

Silisyum temelli teknolojinin, kendi sınırlarına ulaştığı düşünüldüğünde yarıiletken teknolojisinde silikonun yerini alabilecek yeni bir madde arayışı bugünkü araştırmacılar tarafından itina ile sürdürülmekte olup ve bugünden sonraki araştırmacılar tarafından da sürdürülmesi beklenmektedir [1]. Bu yeni madde adaylarından çoğu elenmiş olup hala silisyum bu alanda kullanılan ve en çok güvenilen yarıiletken madde olmuştur. Buna karşın elektronik cihazların boyutları, silisyum teknolojisinin ulaşabileceği boyutlardan daha küçüğe doğru gitmektedir. Bu durumda silisyum yüksek frekanslı elektronik uygulamaları destekleyemeyecektir. Moore kanununa [2] göre entegre bir devrede transistor sayısı her on sekiz ayda bir iki katına çıkmaktadır. Buna göre silisyum tabanlı yarıiletken aletler daha da küçük olması gerekmektedir. Bugünlerde silisyum teknolojisi artık kendi sınırlarına dayanmıştır. Bu durum Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistörlerin (MOSFET) içinde kapı tünellemesi gibi bazı problemler ortaya çıkarmaktadır [3]. Bu yüzden bütün araştırmacılar katıhal teknolojisinde herhangi bir alan problemi çıkartmayacak alternatif bir madde arayışına girmişlerdir. Alternatif bir malzeme grafen olarak ortaya çıkmıştır. Grafenin, silisyumun yerini alabilecek olmasına ana etken geleneksel CMOS elemanları ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir mobilitte ve daha yüksek frekans performansı sergilemesidir [4].

Grafen en basit ifade şekliyle, grafiti ve diğer boyutlardaki karbon allotroplarını oluşturan temel maddedir. İki boyutlu (2D) grafeni, futbol topu şeklinde paketlediğimizde sıfır boyutlu fulorenleri, bir eksen etrafında silindir şeklinde katladığımızda bir boyutlu (1D) karbon nanotüpleri ve düzlem tabakaları birbirlerine paralel üst üste istiflendiğinde üç boyutlu (3D) grafiti oluşturmaktadır [5]. Daha geniş anlamda grafen, iki boyutlu hekzagonal sp^2 şeklinde bağlanmış karbon atomlarının bir tek tabakasıdır [4]. Günümüzde çok popüler olan grafenin aslında mazisi 1960 yılına kadar uzanmaktadır [5-6]. Başlangıçta hiç kimse tek tabaka iki boyutlu grafenin serbest halde var olamayacağını düşünüyordu. 1930'lu yıllarda Peierls [7] ve Landau [8] termodinamik kararsızlıklarından dolayı iki boyutlu kristallerin serbest halde bulunmasının imkansız olduğunu ileri sürmüşlerdir. Onların bu görüşü bazı deneysel gözlemlerle desteklenmiştir. Bilim adamları biliyordu ki, bir

malzemenin erime noktası, azalan kalınlıkla giderek azalmaktaydı. Bu durumda ince filmler atomik tabakaların on katı kalınlıklı adacıklara ayrılmaya başlayacaklardı. Bu yüzden atomik tek tabakalar üç boyutlu yapıların ayrılmaz bir parçası olarak bilinmekteydi. İki boyutlu tabakaların üç boyutlu bir temel olmaksızın serbest halde var olamayacağı varsayılmaktaydı [9-10].

1992 yılında T. Land ve arkadaşları (*ark.*) [11] ve 1993 yılında A. Nagashima ve K. Nuka [12] birkaç tabaka grafeni metal yüzeyler üzerine kimyasal buhar depolama yöntemini kullanarak üretmek istemişlerdi. Fakat bu yaklaşımla mükemmel tek tabakalı grafen üretimini başaramamışlardır. Üretilen birkaç tabakalı grafenlerin, teorik olarak grafen için önerilen üstün değerlere sahip olmadığını tespit etmişlerdi.

2004 yılında Manchester üniversitesinden A. Geim ve K. Novoselov grafeni ayırmak için bir metot geliştirmişlerdi [4]. Bu metot da, tek tabaka grafenlerin ayrılmasını sadece yapışkan bir bant kullanarak sağlamışlardı. Bu yüzden bu yöntemin diğer bir ismi de Selo bant yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen grafen tabakalar yalnızca birkaç atom kalınlığında olmasına karşın çevre koşulları altında kararlı ve yüksek nitelik göstermiştir. A. Geim bu tabakaları, tek tabaka kristal filmler olarak ifade etmiştir. Bu filmlerin, iletim bandı ve valans bandı arasında çok ince aralık bulunan iki boyutlu yarı metal olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu ince filmlerin güçlü bir ambipolar elektrik alan etkisi sergilediğini tespit etmişlerdir. Bu filmlerin $1/\text{cm}^2$ başına 10^{13} kadar varan elektron ve hol konsantrasyonuna sahip olduğunu göstermişlerdi [9]. Bulunan tek tabaka grafenlerin elektrik alan etkisine sahip olup böylelikle yük taşıyıcılarının elektron veya hol (boşluk) olarak ayarlanabileceğini ifade etmişlerdi. Hatta oda sıcaklığında bu tabakaların balistik iletim gösterdiğini kanıtladılar [10]. Uygulanan bir kapı gerilimi ile oda sıcaklığındaki mobilitesinin $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olduğunu gözlemlemişlerdi. Daha sonra A. Geim ve *ark* grafen tabakaları elde etmek için yüksek yönelimli pirolitik grafiti (HPOG) kullanmışlardı. Bu şekilde grafen üretimi daha güvenilir ve $10 \mu\text{m}$ boyutlarına kadar tek tabaka grafen filmler hazırlamaya izin vermişti. Ayrıca daha kalın filmler için (kalınlık $> 3 \text{ nm}$) boyutları $100 \mu\text{m}$ kadar çıkarılabiliyordu [4]. A. Geim ve K. Novoselov yapmış oldukları bu buluş nedeniyle 2010 Nobel Fizik ödülünü [13] almaya hak kazanmışlardır.

2005 yılında Columbia Üniversitesinden Y. Zhang, Y. W. Tan ve P. Kim grafenin kuantum Hall etkisini deneysel olarak gözlemlemişlerdi [14]. Elektronlar iki boyut içerisine sınırlandırıldıklarında, kuantum mekaniksel olarak kuantum Hall etkisi gibi artırılmış iletim durumuna geçmekteydiler. Grafendeki bu kuantum durumu daha önceki yarı iletkenlerden çok farklıydı. Bu fark grafenin benzersiz elektronik özelliklerinden kaynaklanmaktaydı. Grafen, yük nötralliğine yakın noktalarda elektron-hol çakışması ve taşıyıcı kütlelerinin sıfır olması gibi farklı özellikler sergilemekteydi. Y. Zhang ve ark. bu çalışmalarında mikro mekanik yolla üretilen yüksek mobiliteli tek tabaka grafenin magneto iletim mekanizmasını deneysel olarak incelemişlerdi. Deneylerinde, hem elektron hem de hol için olağan dışı olan kuantum Hall etkisini gözlemlemişlerdi. Grafendeki bu olağanüstü kuantum iletim olgusu karbon temelli elektronik ve manyeto-elektronik uygulamalar açısından heyecan verici olmuştur.

2006 yılında Amerikan Fizik Enstitüsünden B. Obradovic ve R. Kotlay grafenin elektriksel özelliklerini karbon nanotüplerle karşılaştırarak açıklamışlardı [15]. Grafenin, daha dar bant aralığına sahip olmakla birlikte nitelik olarak karbon nanotüplerle benzer elektron bant yapısına sahip olduğunu bildirmişlerdi. Çalışmalarında grafenin düşük ve yüksek alan mobilitelerini değerlendirmişler ve aynı birim hücre için karbon nanotüplerden daha yüksek mobiliteye sahip olduğu fakat taşıyıcı konsantrasyonunun ve bant aralığının daha düşük olduğu bulmuşlardı. Mobilité ile bant aralığının arasındaki ters orandan dolayı, grafenin bant aralıkları 0.5 eV dan küçük alan etkili transistörler olarak işletilebileceğini öne sürmüşlerdi. Bu bant aralığında mobilitesi, silisyum mobilitesinden oldukça büyük olduğu görülmüş ve bu yüzden grafenin silisyuma göre düşük güçlü uygulamalar için daha uygun olduğu düşünülmüştür.

Aynı yıl içerisinde D.Graf ve ark. tek ve birkaç tabaka kalınlıklı grafenin Raman spektroskopisini incelemişlerdi [16]. Tek tabaka grafeni 2D çizgisinin genişliğinden yararlanarak çift tabakalı ve birkaç tabakalı grafenden ayırmışlardı. Tek tabakalı grafenler için 2D çizgisi tek bir pik (maksimum) gösterirken çift tabakalı grafende 2D çizgisi farklı piklere ayrıldığını tespit etmişlerdi. Bu bulgularını çift resonant Raman modelini kullanarak açıklamışlardı. Bu modeldeki hesaplamaları, elektronik

yapı ve fonon dağılımlarını temel alarak yapmışlardı. Tek tabaka grafenlerde 2D çizgisinin daha dar olduğunu bulmuşlardı.

Northwestern üniversitesi kimya bölümünden S. Stankovich, D. Dikin ve G. Dommett 2006 yılında grafen temelli kompozit maddeleri incelemişlerdir [17]. Çalışmalarında, grafitin tamamen ayrılmasıyla oluşan grafen-polimer kompozitlerin hazırlanması için genel bir yaklaşım sunmuşlardı. Bilim adamları kimyasal olarak modifiye edilmiş grafen tabakaları polimer içerisine homojen olarak dağıtmışlardı. Polystyrene-grafen kompozitin oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği için bugüne kadar yayımlanan karbon temelli maddeler arasında en düşük olduğunu gözlemlemişlerdi. Çünkü kimyasal işlemlerle oluşturulan grafen tabakalar aslında grafenoksit tabakalardır ve bunlar elektriksel açıdan yalıtıcıdır. Fakat kimyasal dönüşüm sonucu elektriksel özelliğinde çok küçük miktarda iyileşme olmaktaydı. Bu kompozitin yaklaşık 0.1 Sm^{-1} lik bir iletkenliği olduğunu tespit etmişlerdi. Bu iletkenlik çoğu elektriksel uygulama için yeterliydi. Ayrıca grafen temelli kompozitlerin termal, mekaniksel ve optik özelliklerinde değişimler olacağını önermişlerdi.

Kimyasal buhar depolama yöntemi ile birkaç tabaka grafenin başarılı bir şekilde sentezlenmesi ilk olarak 2006 yılında P. Somani ve M. Umeno tarafından gerçekleştirilmişti [18]. Bu çalışma tabaka sayılarının kontrolü ve grafenin katlanması gibi çözilememiş bazı problemlerin çözümü için yeni bir kapı açmıştı. P. Somani ve ark. bu çalışmalarında Ni alttaşı kullanmışlardı. Yapılan çalışmada metal alttaşı kimyasal dağlanmasıyla sonra grafen tabakaları ayrılıp daha sonra diğer bir alttaşı üzerine iletilmişlerdi. Somani ve ark. bu yolla karışık kimyasal ve mekaniksel işlemler olmaksızın birkaç tabaka kalınlıklı grafenlerin üretililebileceğini ortaya koymuşlardı.

Pennsylvania Üniversitesi Fizik Bölümünden N. Staley ve H. Wang bir gölge maske olarak çok ince bir kuvars kullanarak grafen devre üretebilmek için litografisiz bir teknik geliştirmişlerdi [19]. 2007 yılında bu teknik sayesinde litografi sürecinde grafende oluşabilecek kirliliklerden grafeni kurtarmışlardı. Ayrıca bu tekniğin, grafen temelli devrelerde kullanılmasının grafenin elektriksel özelliklerinin gözlenmesinde daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdi. Bu yolla üretilen grafenlerin, Fermi

Enerjisi yakınlarında durum yoğunluklarında çok açık bir azalma görülmüştü.

Aynı yıl grafen üzerine bir başka çalışma Georgia Teknoloji Enstitüsünden Walt A. De Heer ve *ark.* tarafından gerçekleştirilmişti [20]. Ekip çoklu grafen tabakalarını tek kristal silisyum karbür üzerine epitaksiyel olarak büyötmeyi başarmıştı. Elde edilen tabakalardaki yük taşıyıcılarının grafitinkinden farklı olduğunu ve kütesiz Dirac parçacıklarının özelliklerini sergilediğini gözlemlemişlerdi. Ayrıca epitaksiyel grafenin yarı balistik iletim özelliğine sahip olduğunu belirlemişlerdi. Mekanik ayrılma yöntemi ile üretilen grafen tabakaların aksine, epitaksiyel grafenlerde kuantum Hall etkisini gözlememişlerdi. Maddenin yığın halinde lokalize durumların yokluğundan dolayı bu etkinin bastırılmış olduğunu ifade etmişlerdi. Bu yolla üretilen grafenlerin oda sıcaklığında düşük dağılımlı ve yüksek hızlı nanoelektronikler için uygun olabileceğini düşünölmüşti.

Maryland üniversitesinden S. Adam ve S. D. Sarma alttaş kullanmadan sentezlenen grafenlerin (askıda grafen) mobilitelerini incelemişlerdi [21]. Daha önce yapılan deneylerden askıda grafenin taşıyıcı mobilitesinin $200,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ olduğu bilinmekteydi [22]. Amerikalı bu iki bilim adamı askıda grafendeki bu yüksek mobilitenin nedeninin alttaş etkileşiminin olmamasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdi. Çünkü saçılma mekanizmasının temeli olan yük kirlilikleri genelde alttaş üzerinde gerçekleşmekteydi. Saçılma mekanizması mobilitayı sınırlamaktaydı. Buradan hareketle daha önceki yıllarda ortaya atılan minimum iletkenliğin evrensel olmadığını ve daha temiz numunelerin daha yüksek minimum iletkenliğe sahip olduğunu ispatlamışlardı. Askıda grafende geride kalan kirlilik yoğunluğu yaklaşık olarak $1\text{-}2\times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ iken, SiO_2 alttaş üzerindeki kirlilik yoğunluğu 2×10^{12} olarak gözlemlediler. Askıda grafenin kirlilik yoğunluğunu belirlemek için spektroskopik aletler kullanmışlardı.

2008 yılında iki bağımsız çalışma grubu grafitin asit içinde işleme tabi tutmasıyla grafen tabakalara ayrılabilceğini göstermişlerdi. Stanford Üniversitesinden H. Dai ve *ark.* ile Oxford ve Cambridge Üniversitelerinden Jonathan ve *ark* asitleri kullanarak grafen tabaka elde etmeyi başarmışlardı [23] H. Dai ve *ark* komşu iki grafen tabaka arasındaki mesafeyi giderek artırdığı için deneylerinde tetrabutylammonium hydroxide (TBA) kullanmışlardı. Asitlerle ultrasonik işleme

tabi tutulan grafit birkaç tabaka grafene ayrılmıştı. Ancak asitle işlem esnasında oluşan grafen tabakalarda boşluklar ve kusurlar olduğu gözlemlenmişlerdi. Bu kusurlardan yük taşıyıcılarının saçılmaya uğramasının grafenin mobilitesini önemli ölçüde düşürdüğünü tespit etmişlerdi.

Grafenin özelliklerin tam anlamıyla incelenebilmesi için bu maddenin büyük miktarda ve nitelikli olarak üretilebilmesi için yeni bir metoda ihtiyaç duyulmuştu. Bu ancak iki yolla olabilmekteydi. Grafen ya büyük alanlarda büyütülmeli ya da büyük alanlarda mekanik ayrılma gerçekleştirilmeliydi. 2008 yılında Y. Hernandez ve ark. bu problemi aşmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdi [24]. N-methylpyrrolidone gibi organik çözücüler içerisinde grafitin ayrılmasıyla, konsantrasyonu yaklaşık 0.01mg/ml olan çözeltiler elde etmişlerdi. Organik bir çözücü içerisinde grafitin ayrılmaya uğraması için, organik çözeltilerin yüzey enerjileri önemliydi. Çözeltinin yüzey enerjisinin grafenin ayrılması için gerekli olan enerjiye eşit olması gerekmektedir. Hernandez ve ark. buna uygun organik çözücüler kullanarak ultrasonik işlem yoluyla grafen tabakalar üretmişler ve bunları Raman Spektroskopisi (RS) ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) kullanarak doğrulamışlardı. Elde edilen bu grafen tabakalarda kusurların veya oksitlerin olmadığını Raman ve infrared spektroskopiler kullanılarak tespit etmişlerdi. Bu yöntemle yarı şeffaf iletken flimler ve iletken kompozitler üretilebileceğini öngörmüşlerdi. Hernandez ve ark. polystyrene-grafen kompozitin iletkenliğini yaklaşık olarak 100 S m^{-1} olarak ölçmüşlerdi. Bu değer daha önceki yıllarda yapılmış olan grafenoksit temelli kompozit maddelerin iletkenlik değerinden çok yüksekti.

Aynı yıl içerisinde benzer bir grafen elde etme yöntemi daha ortaya konulmuştu. Bu kez K. Liao ve ark. iki adımda birkaç tabaka grafen elde etmeyi başarmışlardı [25]. Birinci adımda grafiti $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar sıcaklıklara ısıtılarak genişlemesini sağlamışlardı. Bu termal işlem yaklaşık 1-2 dakika kadar gerçekleştirilmişti. İkinci adımda ise 1mg genişletilmiş grafiti 10 ml lik Poly(m-phenylenevinylene-co-2,5-dioctoxy-p-phenylenevinylene) çözeltisinin içerisinde 5 dakika boyunca yüksek şiddetli ultrasonik işleme tabi tutmuşlardı. Santrifüj işleminden sonra elde ettikleri birkaç tabakalı grafenlerin Raman Spektroskopisini analiz ederek kusursuz ve oksitsiz grafen tabakalar olduklarını tespit etmişlerdi.

Diğer bir çalışmada grafenin görünebilirliği üzerine Singapore Üniversitesinden G. Teo ve ark. tarafından gerçekleştirilmişti [26]. Grafen tabakaların görünebilirliğini hem teorik hem de deneysel olarak incelemişlerdi. Tek tabakalı grafenler, bir optik mikroskop altında çeşitli dielektrik tabakalar üzerinde görülebilmemesine rağmen metalik ve yarıiletken alttaşların çoğunun üzerine direk olarak yerleştirildiğinde görülememekteydi. G. Teo ve ark. uygun kalınlıkta bir resist tabakayla kaplandığında metalik ve yarıiletken alttaşların çoğunun üzerinde tek tabaka grafenin kolaylıkla görülebileceğini göstermişlerdi. Deneylerinde kuvars ve NiFe kaplanmış Silisyum alttaş üzerinde tek tabaka grafenin görülebileceğini doğrulamışlardı. Çalışma çeşitli alttaşlar üzerine grafen temelli devreler kurma konusunda faydalı olmuştur.

Florida üniversitesinden Y. Ouyang, P. Campbell ve J. Guo tek ve iki tabakalı grafen kanalları ile metal-oksit yarıiletken alan etkili transistörlerin balistik performans sınırlarını karşılaştırmışlardı [27] Düşük Kaynak-Akaç gerilimi altında ve düşük sıcaklıklarda iki tabakalı devrelerdeki akım kaçığının tek tabakalılarından daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdi. Sıcaklık ve Kaynak-Akaç gerilimi artırılmasına karşın iki tabakalı devrenin hala nitelikli bir biçimde farklı olduğunu tespit etmişlerdi. İki tabakalı devrelerdeki akım-gerilim karakteristiği daha da uygun olduğu anlaşılmıştı. Ayrıca kanal boyuna bağlı olarak kanal iletkenliğinin de farklılık gösterdiğini ortaya koymuşlardı.

Başka bir çalışmada J. Moser ve ark. mikromekanik yöntemle hazırlanan grafen tabakaların elektrostatik durumunu incelemişlerdi [28]. Bunu yapabilmek için elektrostatik kuvvet mikroskobunu kullanmışlardı. Grafen hazırlama sürecinde kullanılan yapışkan bantlardan geriye kalan kirliliklerin grafen üzerinde absorbe edilmiş su moleküllerin dipolüne ek olarak bir elektrik dipol oluşturduğunu gözlemlemişlerdi. Su moleküllerin ve bant kirliliklerin, yaklaşık olarak 10^9 Vm^{-1} kadar büyüklükte bir elektrik alan oluşturabilecek bir dipol tabaka oluşturduklarını ortaya koymuşlardı. Oluşan bu dipol tabakanın grafenin elektriksel özelliklerini değiştireceğini öngörmüşlerdi.

Aynı yıl diğerk bir çalışmada ise California niversitesinden Q.Shao ve ark. yüksek sıcaklıklarda grafenin elektriksel direncini deneysel olarak incelemişlerdi. İlk aşamada mekaniksel ayrılma yöntemi kullanarak tek ve iki tabakalı grafenler üretmişlerdi [29]. Yarı-metal olan grafenin direncinin sıcaklığa bağlılığını, yüksek sıcaklıklarda elektron-fonon sağılmasının giderek artmasından yararlanarak açıklamışlardır. Metaller ve yarı-metallerde sıcaklık değişimiyle yk taşıyıcılarını sayısı değişmezken, fononların birbirleriyle olan etkileşiminin artmasından dolayı yarı-metal olan grafende giderek artan sıcaklığın direncin artmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Düşük sıcaklıklarda ise direncin, kirlilikler tarafından sınırlandırılmış olduğunu ve direnç azalıırken mobilitenin artacağını bildirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar entegre devrelerdeki grafen bağlantılı uygulamalar için umut verici olması bakımından çok önemli görülmüştür.

2008 yılında California niversitesinden S. Ghosh ve ark. grafenin termal iletkenliği üzerine bir dizi çalışma yapmışlardı. alışmalarında Si/SiO₂ alttaş üzerine depolanan grafenin termal iletkenliğini ölçmeye çalışmışlardı [30]. Termal iletkenlik ölümünü yapabilmek için mikro Raman Spektroskopisine dayalı bir teknik kullanmışlardı. Oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda ortalama serbest yolu yaklaşık 775 nm olan grafenlerin 3080-5150 W/mK oranında oldukça yüksek termal iletkenlik sergilediklerini ortaya koymuşlardı. Tek tabaka grafen için bulunan termal iletkenlik değeri karbon nanotüpler için kabul edilmiş termal iletkenlik değerinden daha yüksek bulmuşlardı. Deneysel sonuçlardan elde edilen bilgiler grafenin gelecek de nanoelektronik devrelerde ısı düzenleyici madde olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Başka bir çalışma ise Fransa da A. Shukla ve R. Kumar yapmışlardı [31]. Bu çalışmalarında farklı bir metotla grafen üretimini gerçekleştirmişlerdi. İlk aşamada, ateşe dayanıklı bir cam ile grafitin anotsal bir bağlanma yapmasını sağlamışlardı. Bunun olabilmesi için 200-400 C arası sıcaklıklarda iki yapı arasına bir elektrik alan uygulamışlardı. Kimyasal bağlanma sağlandıktan sonra yapışkan bir bant kullanılarak tek veya birkaç tabaka grafeni mekanik ayrılma yoluyla elde etmişlerdi. Bu yöntemle elde edilen grafenler hem daha hızlı hem daha ucuz hepsinden de önemlisi daha büyük alanlara ıkabilmekteydi.

Bir başka çalışma 2009 yılında Romanya'dan M. Dragoman ve D. Dragoman tarafından yapılmıştı [32]. İki bilim adamı çalışmalarında grafen temelli kuantum elektronigine yoğunlaşmışlardı. Grafen balistik iletim sergilemesinden dolayı en yüksek mobiliteye sahipti. Grafen tabakalar uygulanan bir gerilim, basınç veya oksijen ya da hidrojen gibi çoğu molekülün kimyasal emilimi ile kolayca yönlendirilebilmekteydi. Yönlendirilebilen grafen demek kuantum elektronik için anahtar bir kavram olmuştu. İşte grafenin sahip olduğu bu benzersiz özelliklerden dolayı grafen temelli birçok yeni kuantum elektronik devrelerin kurulabileceğini öne sürülmüştü.

2010 yılında X. Deng ve ark. farklı bir yöntem kullanarak grafen sentezlemişlerdi [33]. 15 V statik potansiyel altında elektrik ileticisi olarak potasyum hexafluorophosphate çözeltisini kullanarak elektroliz metotla grafen üretmeyi başarmışlardı. Bu yolla grafen üretimi hem çok basit hem de çok hızlı olmaktaydı. Elde ettikleri grafen tabakaların karakteristiklerini Taramalı Elektron Mikroskobu, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Raman Spektroskopisini kullanarak yapmışlardı. Grafenlerin ortalama kalınlığı 1nm civarındaydı. Ayrıca bu numuneleri geliştirerek, sudan Pb (II) ve Cd (II) iyonlarını çıkarmak için kullanmışlardı. Numunelerin adsorpsiyon kapasitelerinin Pb(II) için 406.6 mg/g ve Cd (II) için ise 73.42 mg/g olduğunu tespit etmişlerdi. Bu değerler karbon nanotüpler için elde edilen adsorpsiyon değerlerinden çok yüksekti. Adsorpsiyon sürecinin 40 dakikada dengeye ulaştığını gözlemlemişlerdi.

Epitaksiyel olarak üretilen tek ve çoklu tabaka grafenlerin NO₂ karşı duyarlılığını test etmek için İsveç'li bilim adamları R. Pearce ve T. Lakimov bir dizi deneyler yapmışlardı [34]. Çok tabaka grafenlerin yalnızca en üst tabakaları gaza maruz kalmadığı aynı zamanda alt tabakalarında gaza maruz kaldığı için daha düşük bir duyarlılık sergilediğini tespit etmişlerdi. Bu durumun nedenini olarak da en üst grafen tabakadaki yük taşıyıcılarının daha yüksek olmasından dolayı duyarlılık daha düşük olabileceğini düşünmüşlerdi. Oysa tek tabaka grafen temelli devreler NO₂ nın düşük konsantrasyonuna oldukça duyarlılardı. Bu uç nokta duyarlılık epitaksiyal

olarak konsantrasyonundan kaynaklanabileceğini düşünmüşlerdi. Grafenin elektronik özelliklerinin ayarlanabilmesi alttaştan elektron katkılama ile mümkün olabilmekteydi. Bu durum gerekli konsantrasyon oranında çok duyarlı bir gaz algılayıcı olarak kullanılabileceği ispatlanmış oldu. Ayrıca sıcaklığa bağlı direnç ölçümü gerçekleştirmişlerdi. N₂ ve O₂ gazlarının akışı altında sıcaklık 25 °C den 150 °C kadar dakikada 10 ar derece artırılarak çok tabakalı grafenlerin direnç ölçümlerini yapmışlardı. Ölçüm sonuçlarına göre giderek artan sıcaklıkla çok tabakalı grafenlerin dirençlerinin giderek azaldığı gözlemlenmişti.

Sabancı Üniversitesinden B. Saner, F. Dinç ve Y. Yürüm 2011 yılında yakıt hücreleri içerisinde elektrod madde olarak kullanılacak grafen nanotabakaların yapısal özelliklerini farklı oksidasyon zamanlarında incelemişlerdi [35]. Oksidasyon zamanı giderek artırıldığında, grafitin içindeki grafen tabakalar arası bağ kuvveti giderek azalmaktaydı. Bunun sonucunda grafen tabakalar, birkaç tabaka şeklinde ayrılmaya başlamaktaydı. Oksidasyon zamanını kontrol edilerek tabaka sayısını kontrol etmek mümkün olmaktadır. Uygun oksidasyon zamanlarında grafenoksit tabaka elde etmenin daha kolay olduğu lakin oksidasyon belli bir değerin üzerine çıktığında grafen tabaka sayısı giderek azaldığını tespit etmişlerdi. Ayrıca grafen nanotabakaların, grafenoksitten termal olarak daha kararlı olduğunu gözlemlenmişti. Raman ölçümlerinde oksidasyon zamanı artırıldığında G ve D banttaki şiddet oranının ($I(G)/I(D)$) giderek azaldığını tespit etmişlerdi. İşlemden geçirilmiş grafen tabakaların yakıt hücreleri için daha verimli ve uygun olduğunu öne sürmüşlerdi.

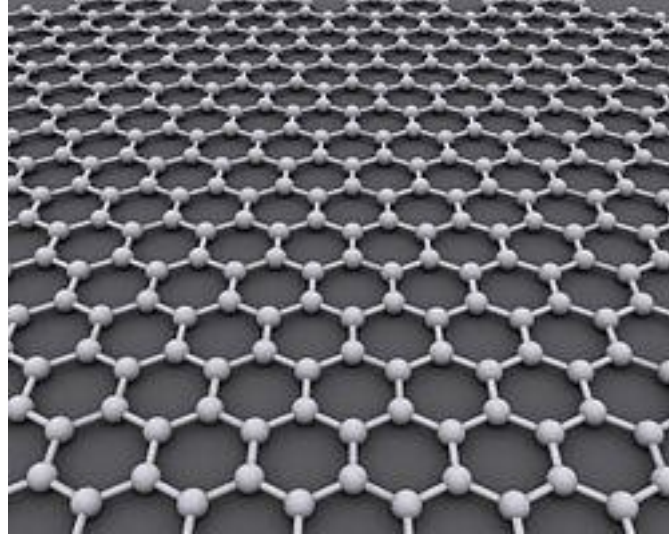
Yine aynı yıl Toledo Üniversitesinden M. Gautom ve ark. bir başka çalışma yapmışlardı [36]. Grafen temelli devrelerin gaz algılama özellikleri incelemişlerdi. İncelenen grafenleri bakır alttaş üzerine, hidrojen ve metan gazlarının altında kimyasal buhar depolama yöntemini kullanarak sentezlemişlerdi. Grafen devrelerin gaz algılama özelliklerini sıcaklığın ve gaz konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak incelemişlerdi. Deneysel bulgular, gaz algılanma karakteristiğinin sıcaklığa, gaz konsantrasyonuna ve çevredeki gaz birleşimlerine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermekteydi.

Grafen tabanlı devrelerde gazlara karşı duyarlılığın en iyi olduğu sıcaklığın 150 °C ile 200 °C arasında olduğunu gözlemlemişlerdi. NH₃, CH₄ ve H₂ gibi gazların farklı duyarlılığa sahip olduğunu tespit etmişlerdi. Bu gazların konsantrasyonlarının değişmesiyle de duyarlılıklarının değiştiğini gözlemlemişlerdi.

2. GRAFENİN BANT YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Grafenin Bant Yapısı

Grafenin termal ve elektriksel iletim mekanizmasının iyi anlaşılabilmesi için öncelikle bant yapısının çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi grafen, hekzagonal sp^2 şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarının tek tabakasıdır [4].

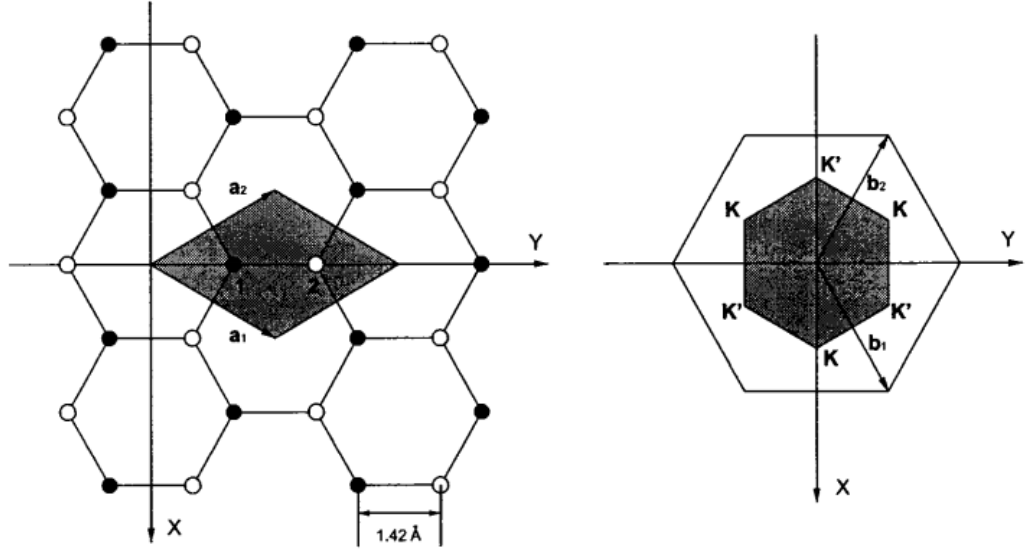


Şekil 2.1 Grafen tek tabakanın şematik görüntüsü [37].

Her bir karbon atomu üç tane komşu karbon atomuyla kovalent bağ yaparak iki boyutlu bir yapı oluşturmuştur. Her tabaka ise kendi arasında Van der Waals bağı ile bağlanmıştır. Van der Waals bağ kuvveti kovalent bağ kuvvetinden çok daha zayıf olduğu için grafit her bir tabaka yönünde kolayca ayrılabilir.

Grafenin kristal yapısı Şekil 2.2 deki gibi olup örgü vektörleri aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{a}_1 = a \left(\frac{1}{2} \hat{x}, \frac{\sqrt{3}}{2} \hat{y} \right) \quad \mathbf{a}_2 = a \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x}, \frac{1}{2} \hat{y} \right) \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 Grafen ve onun ters örgüsü. Solda: $\mathbf{a}_1$ ve $\mathbf{a}_2$ örgü vektörleridir. Her bir birim hücre içerisinde iki tane karbon atomu vardır. Birim hücre koyu alandır. Sağda: grafenin ters örgü vektörleri $\mathbf{b}_1$ ve $\mathbf{b}_2$ ile belirlenmiştir. Birinci Brillouin bölgesi koyu bölge olarak gösterilmiştir [37].

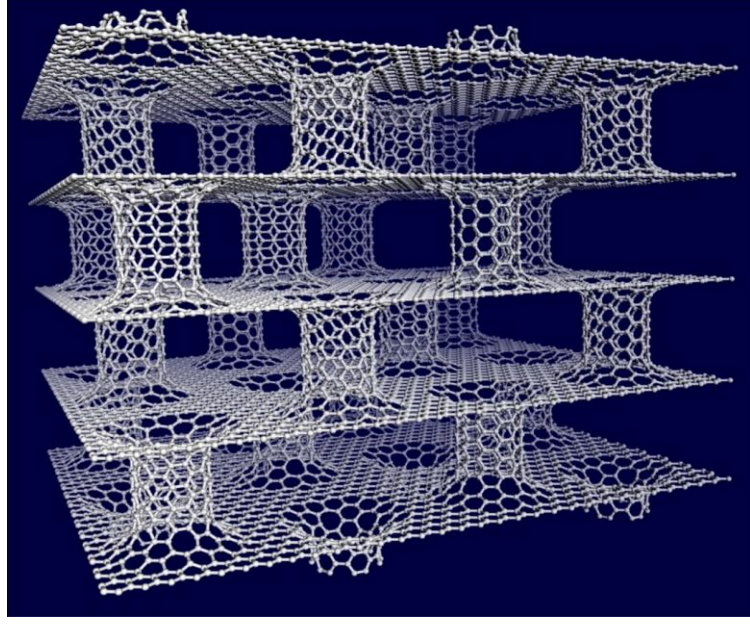
(x-y) koordinatları düzlemindeki örgü sabiti $a = \sqrt{3}a_0$ 'dır. Burada a_0 en yakın iki komşu atom arasındaki mesafe olup 0.142 nm dir. İlkel örgü vektörünün boyu 0.246 nm dir. Bu örgü vektörlerinin ters örgü vektörleri ise şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\mathbf{b}_1 = \frac{4\pi}{\sqrt{3}a} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x}, \frac{1}{2} \hat{y} \right) \quad \mathbf{b}_2 = \frac{4\pi}{\sqrt{3}a} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \hat{x}, \frac{1}{2} \hat{y} \right) \quad (2.2)$$

Grafenin Brillouin bölgesi K ve K' noktalarında iki vadi içermektedir. Bu noktaların koordinatı ise;

$$K = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{3}, 0 \right) \quad K' = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.3)$$

Şekil 2.2 de görüldüğü üzere her birim hücrede iki tane karbon atomu bulunmaktadır. Her karbon atomu dört valans elektronuna sahip olup grafen düzlem üzerindeki diğer üç karbon atomu ile kimyasal bağ yapmak için kullanılmıştır [38].



Şekil 2.3 Grafenin bağ yapısının şematik görüntüsü [37].

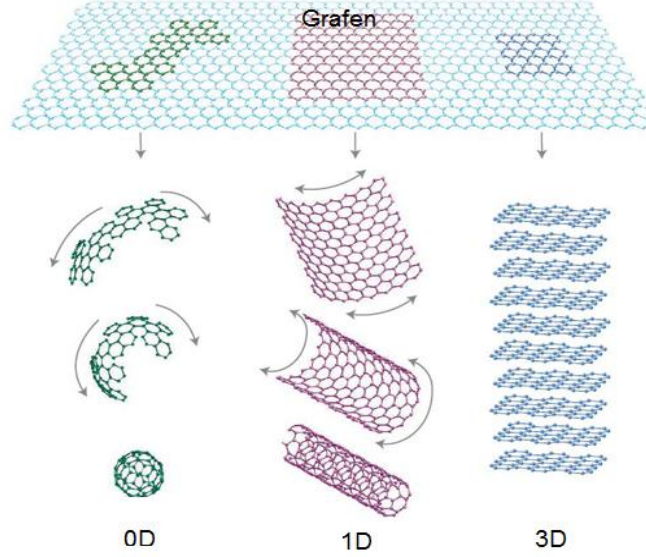
Bu bağlar sigma (σ) bağları olarak ifade edilmiştir. Sigma bağları örgü yapısının sağlamlığından sorumludur. Dördüncü elektron $2p_z$ orbitalinde olup düzleme dik olarak yönelmiştir. σ bağları oldukça lokalizedir ve elektronik iletme katkı sağlamamaktadır. Bu yüzden elektriksel iletimde yalnızca dördüncü elektronun enerji bant yapısı ile ilgilenilmiştir. Bunlar π bağları olarak bilinmektedir. Birim hücresi içerisinde iki elektron bulunmaktadır. Bu yüzden iki tane π bandı olmalıdır. Biri valans bandındaki π , diğeri iletim bandındaki π' dir [37-38].

Grafende bant aralığı çok küçük olup, iletim ve valans bandı arasındaki enerji farkı $\delta\epsilon$ kadardır. Grafenlerin tabaka kalınlığı değiştikçe bu değer 4 meV den 20 meV ye kadar değişmektedir. Üç boyutlu grafitte, iki boyutlu grafene nispeten bu bant aralığı değeri çok daha yüksektir ve yaklaşık olarak 40 meV değerindedir. Tabaka sayısının giderek azalmasıyla $\delta\epsilon$ aralığının giderek azaldığı gözlemlenmiştir. Sonuçta tek tabaka grafen sıfır bant aralıklı yarı iletken olarak tanımlanmıştır [4].

2.2 Grafenin Elektriksel Özellikleri

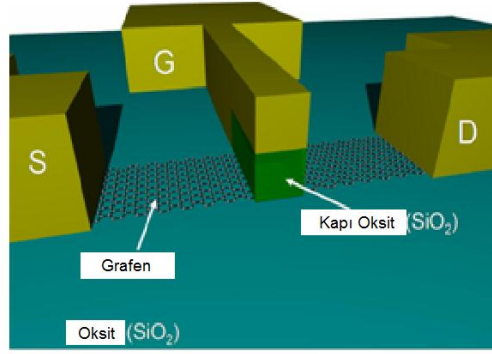
Yukarıda da bahsedildiği gibi grafen; sıfır boyutlu fulorenleri, bir boyutlu karbon nanotüpleri ve üç boyutlu grafiti oluşturan madde olmuştur [5]. Özellikle bunlar

arasındaki karbon nanotüplerin sergilemiş oldukları elektriksel özellikler grafenin elektriksel özelliklerine karşı olan ilgiyi daha da artırmıştır [43].



Şekil 2.4 Grafen tabakadan 0D fulloren, 1D karbon nanotüp ve 3D grafitin oluşması [9].

Grafene olan büyük ilginin asıl nedeni, bu maddenin elektriksel alan etkisi sergilemesidir. Onun elektriksel alan etkisine sahip olması bir transistör olarak kullanılacağı anlamına gelmektedir. Grafenden yapılan transistörden alınan sonuçlara göre grafenin iletkenliği kapı voltajının bir fonksiyonu olarak değişmektedir geçtiğini göstermektedir. Bu durum uygulanan kapı gerilimine karşılık öz direncin değiştiğini göstermektedir. Uygulanan kapı gerilimi giderek artırıldığında öz direnç giderek azalmaktadır (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir). Buna karşın iletkenlik uygulanan kapı geriliminin giderek artmasıyla lineer olarak artmıştır. $V_g = 0$ civarlarında Hall etkisinin işareti değişmiştir [39].



Şekil 2.5 Grafen FET şeması [40].

Bu işaret değişimi, uygulanan bir pozitif kapı gerilimi ile elektronların büyük konsantrasyonunun harekete geçtiğini veya uygulanan negatif kapı gerilimi ile hollerin büyük konsantrasyonunun harekete Geçiş bölgesi V_g dan uzaklaştıkça Hall katsayısı;

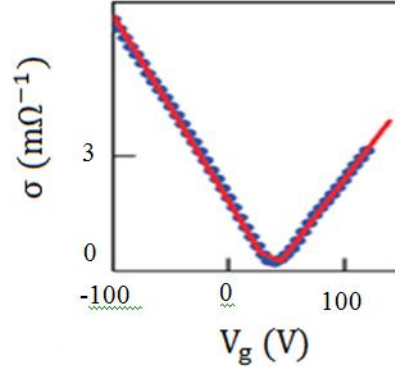
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (2.4)$$

olarak değişmiştir. Burada n elektron veya hollerin konsantrasyonudur ve e elektronun yüküdür. Alan tarafından sebep olan yüzeydeki yük yoğunluğu teorik olarak;

$$\frac{n}{V_g} \approx 7.2 \times 10^{10} cm^{-2} V^{-1} \quad (2.3)$$

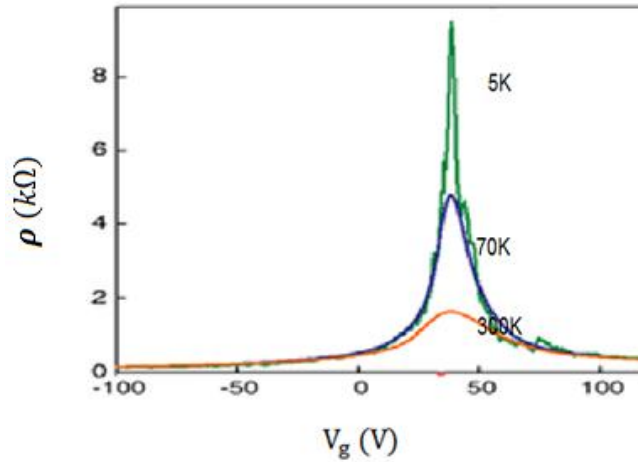
tahmin edilmiştir [4]. Tek duvarlı karbon nanotüplerin kapı gerilimi bağıllığıyla karşılaştırıldığında grafenin kapı gerilimi bağıllığı oldukça farklılık göstermiştir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin iletkenliği uygulanan kapı voltajının giderek artırılmasıyla, azalmaya başlamıştır. Tek duvarlı karbon nanotüpler sadece hol taşıyıcılarını içeren bir p-tipi yarıiletken olarak düşünülebilmiştir [43]. Grafene gelince, hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletken karakteristiği gösterebilmektedir.

Buradan grafenin her iki yük taşıyıcısını da içeren bir madde olduğu anlaşılmıştır. Bu yük taşıyıcıları dışarıdan uygulanan kapı gerilimiyle kontrol edilebilmektedir.



Şekil 2.6 İletkenliğin kapı gerilimine göre değişimi [4].

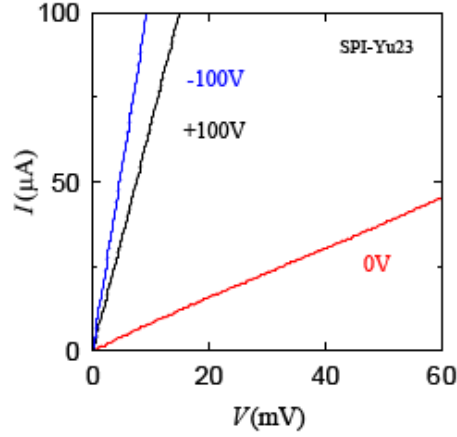
Madde içindeki elektronların (yük taşıyıcılarının) yönetilebilmesi modern elektroniğin kalbi olduğu için grafen içindeki elektronların bu farklı davranışı, silisyum tabanlı yarı iletken teknolojisinin limitlerinin daha ötesine gitmemiz konusunda bize izin vermesi beklenmektedir [4].



Şekil 2.7 Üç farklı sıcaklıkta elektrik alan etkisi (5 K, 70 K 300 K deki alan etkisi) [4].

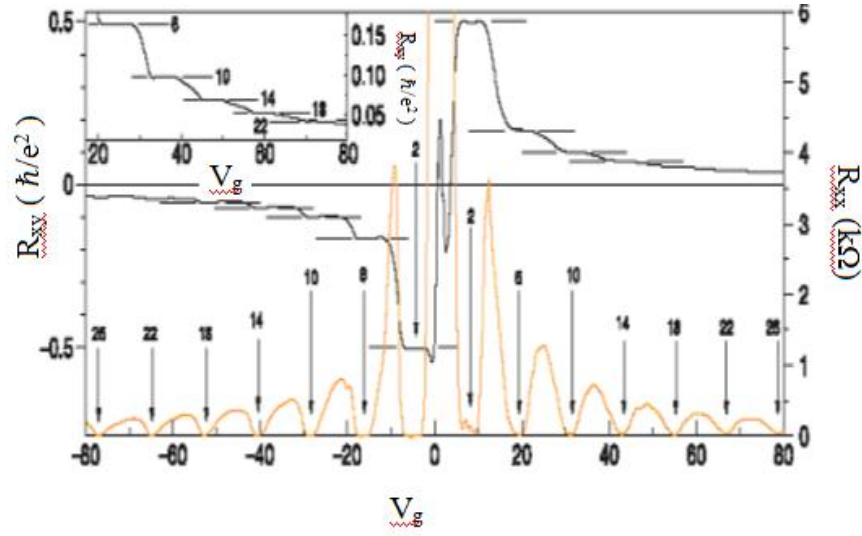
Sıcaklık giderek düşürüldükçe kapı geriliminin etkisi daha büyük olduğu görülmüştür. Çok tabakalı grafenlerde 300 K sıcaklıklarda mobilite $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ iken, 4 K sıcaklıklarda mobilite $60000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olduğu gözlenmiştir [4-40]. Tabaka

kalınlığı giderek artışında kapı geriliminin etkisi giderek kaybolur. Grafit, görülebılır kapı bağımlılığı olmaksızın temelde elektriksel olarak iletkendir. Uygulanan akım ve gerilim arasında lineer bir ilişki görülmüştür.



Şekil 2.8 Uygulanan kapı gerilimine bağlı olarak grafenin akım-gerilim karakteristiği [41].

Buna ek olarak, düşük sıcaklıklarda uygulanan bir manyetik alan altında elektrik alan etkisinin kuantize olduğu gösterilmiştir. Bu durumda grafenin kuantum Hall etkisine sahip olduğu gözlenmiştir (KHE) [42]. Grafenin daha önceleri diğer hiçbir maddede olmayan bazı özellikleri olduğu bilinmekteydi. Bunlar arasında en dikkat çeken grafenin olağan dışı Hall etkisine sahip olması ve onun hiçbir zaman sıfır iletkenlik göstermemiş olmasıydı. Grafenin olağan üstü Hall etkisi alışılmış bir metalden bir grafen tabakasını kesin bir şekilde ayırmaktadır. Kuantizasyon o kadar kesindir ki kuantum Hall etkisi, öz direncin ölçülmesinde kullanılmıştır. Grafendeki durumda ise onun dejenere spin durumları ve bantlarından dolayı her bir iletkenlik platosunun değerine 4'ün bir faktör olarak katkı sağladığı ortaya konmuştur. Hatta grafenin içinde kuantize olmuş atomların gerçek dizileri düzenli kuantum Hall etkisinden ayrılmıştır. Hall iletkenliğindeki ilk plato yarı donmuş Landau seviyesinde bulunan ($2e^2/h$) elektron yoğunluğundan oluşmuştur. Gelecek plato ise $4e^2/h$ ile ayrılmış değerde oluşmuştur. Dahası araştırmacılar, kuantum Hall etkisinin numunenin kalınlığına karşı oldukça duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Hatta iki tabaka grafen numunenin bu olağan dışı Hall etkiyi göstermediğini görmüşlerdi.



Şekil 2.9 Kuantum Hall etkisi [42].

Bu yüzden ki kuantum Hall etkisi tek tabaka ile çok tabaka grafeni birbirinden ayırt etmede kullanılmıştır. Manyetik alanlı veya alansız bir kapı voltajı uygulandığında uzunlamasına öz direnç önemli ölçüde giderek artmıştır. Çünkü Fermi seviyesi, durum yoğunluğunun etkin bir şekilde sıfır olduğu Dirac noktasına kaymıştır. Bu durum grafeni değişimlere karşı oldukça duyarlı yapmıştır. Fakat grafen minimum iletkenliğin kapı voltajı kaldırılmasına karşın sıfır değerine gitmediği tespit edilmiştir. Grafenin iletkenlik değerinin minimum $4e^2/h$ civarında olduğu gözlemlenmiştir. Lakin minimum iletkenliği bu değerden daha da düşürülebilmek mümkündür. Numune tavlandığında üzerindeki kalıntı parçalar tavlama ile üzerinden uzaklaştırılmıştır. Bu durumda minimum iletkenlik daha da küçük bir değere ulaşmıştır [40].

Grafendeki direncin, iletkenliliğe bağlılığı

$$\rho^{-1} = \sigma = ne\mu \quad (2.4)$$

şeklinde olup σ çok küçük V_g ile değişip ve V_g nin değişimi taşıyıcı tipini belirlemiştir. Daha önce de belirtildiği gibi V_g nin değişimi (negatif veya pozitif

oluşu) Hall katsayısının işaretini değiştirmiştir. Ayrıca elektrik alan olmadan da direncin pik noktasında bir kayma gözlemlenmiştir. Bu kaymanın sebebi istemsiz bir şekilde grafen tabaka tarafında absorbe edilen su buharı yüzünden olmuştur. Lakin bu sebeple kayan pikin yerini değiştirmek vakum ortamında mümkündür. Genelde vakuma alındığında sıfır kapı gerilimine yakın bölgeye kaymalar gerçekleşmiştir. Grafendeki taşıyıcı mobilitesi, elektrik alan ve magneto direnç ölçümlerinden sırasıyla şu şekilde belirlenmiştir.

$$\mu = \frac{\sigma(V_g)}{en} \quad (2.5)$$

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.6)$$

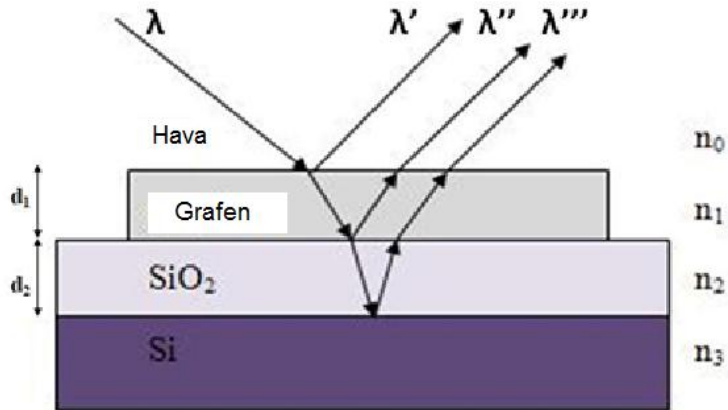
Her iki durumda da mobilite hesabı hemen hemen aynı değeri vermiştir. Mobilite pratikte sıcaklıktan bağımsız olup kusurlar tarafından saçılmalarla sınırlandırılmıştır. İki boyutlu grafen tabakalar içerisinde taşıyıcı konsantrasyonu $n = 5 \times 10^{12} \text{ 1/cm}^2$ ve serbest yol uzunluğu yaklaşık olarak $0.4 \mu\text{m}$ iken mobilite değerinin $10000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olduğu bulunmuştur [4].

Bu günlerde çok iyi bilinmektedir ki, grafenin özellikleri altta ve düzensizliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etki yapılan deneylerle doğrulanmıştır. 30 K den düşük sıcaklıklarda taşıyıcı yoğunluğu yaklaşık 10^9 1/cm^2 olan askıda grafen tabakaların mobilitesi yaklaşık olarak $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerine ulaşmıştır. Yine de altta kullanılarak üretilen tek tabaka grafenden beklentiler çok yüksek olmuştur. Alttaşın zararlı etkisine rağmen tek tabaka grafenler oda sıcaklığında 100 nm lik uzunlukta ve çok düşük sıcaklıkta $1 \mu\text{m}$ uzunluklarda balistik iletim sergilemişlerdir. Son zamanlardaki çalışmalar da, HOPG den elde edilen tek tabaka grafenlerin 10 K den düşük sıcaklık ve 10^9 1/cm^2 den küçük taşıyıcı yoğunluğunda mikrometre uzunluklarda balistik iletim özelliği sergilediğini göstermişlerdir [4].

Grafen, yukarıda belirtilen bu üstün elektriksel özelliklerinden dolayı gelecek nesil elektronik devreler için potansiyel bir madde olmuştur. Grafenin tek dezavantajı, bant aralığının sıfıra yakın olmasından dolayı mantık devrelerinde kullanılmaya uygun olmayışıdır.

2.3 Grafenin Optik Özellikleri

Grafenin kalınlığının ideal değeri 0.34 nm dir [44]. Bu kalınlık grafenin bir optik mikroskopla zor görülebileceğini düşündürmektedir. Grafen tabakaların görünebilirliği üzerine yapılan ilk çalışmalarda, görünebilirlik direk olarak ve kesin bir şekilde dielektrik tabakanın kalınlığına bağlanmıştı. Hatta öyleki dielektrik tabaka kalınlığı 300 nm yerine 315 nm (yani % 5 lik bir farkla bile) seçildiğinde tek tabaka grafenin görülemeyeceği ileri sürülmüştü [9-45]. Fakat 2008 yılında Singapore üniversitesinden G. Teo ve ark bu durumun böyle olmadığını hem deneysel hem de teorik olarak ispatlamışlardı [26]. Deneylerinde farklı kalınlıkta dielektrik kaplı alttaşların üzerinde tek tabaka grafenin görülebileceğini ispatladılar.



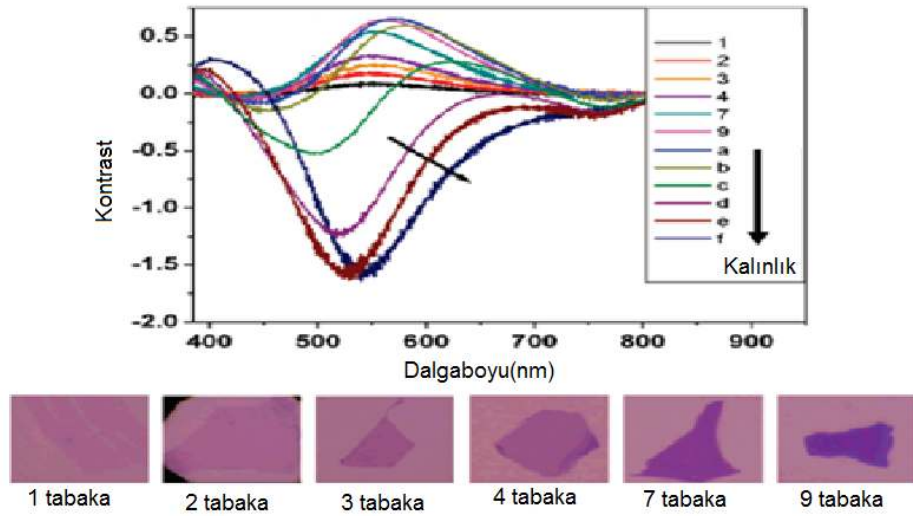
Şekil 2.10 Si/SiO₂ alttaş üzerindeki grafen tabakadan ışığın yansıması [92].

Görülebilmemenin asıl nedeni, alanın yüzeyi ile alana depolanan grafenin kontrast farklılığıdır. Hatta deneysel gözlemler, tek tabaka grafenlerin çoğu yarıiletken ve metallerin üzerinde de görülebildiğini ortaya çıkarmıştır. Tek tabaka grafenin sadece bir tek tabaka olmasına rağmen gelen ışığın % 2.3 ünü absorbe ettiğini göstermiştir.

Işığın emilimi tabaka sayısının artmasıyla, giderek artar ve her bir tabakanın emilimi;

$$A = 1 - T = \pi\alpha = \% 2.3 \quad (2.7)$$

Burada $\alpha \approx 1/137$ değerinde olup ince yapı sabitidir. Tabaka sayısının artması grafenin görünebilirliğini daha da artırmaktadır [46]. Grafen yüzeyi üzerinde ışığın emilimi, grafen içerisinde elektron-hol çiftini oluşturmaktadır. Bir dış alan uygulandığı zaman bu elektron ve holler ayrılıp akabinde foto akım oluşturmaktadır. Bir iç alan uygulandığında da benzer bir davranış oluşmaktadır. Bu alan elektrodlarının yanında oluşmuştur [47]. Grafenin bir diğer özelliğide foto ışıltanım özelliğidir. Uygun bir bant aralığında grafenin ışıltanım yapması mümkündür [48].



Şekil 2.11 Farklı tabaka sayılarına sahip grafenin optik görüntüsü [26].

Grafen optiksel ve elektriksel özelliklerinin birleştirilmesi, fotonik ve optoelektronik uygulamalar için yeni bir yol açmıştır. Grafenin bu özellikleri sayesinde fotodetektör, dokunmatik ekran, ışık yayan devreler ve optik sınırlayıcılar gibi devrelerde kullanılması mümkündür [13-26].

2.4. Grafenin Mekaniksel Özellikleri

İstenmedik gerginlik, elektronik aletlerin ömrünü ve performansını etkilemektedir. Genelde kristalimsi maddelerin üzerine bir dış stress uygulandığında içteki atomik mesafeler değişmektedir. Bu durum elektronik yüklerin yeniden dağılmasına neden olmaktadır. Karbon nanotüplerden sonra en yüksek elastikiyet modülü grafen için yayınlanmıştır. Yapılan çalışmada tek, çift ve üç tabakalı grafenlerin elastikiyet modülü karşılaştırılmıştır. Tek tabaka grafen için, $E = 1.02$ TPa çift tabaka grafen için, $E = 1.04$ TPa ve üç tabaka grafen için, $E = 0.98$ TPa olduğu tespit edilmişti [49-50]. Bunlar arasında tek tabaka grafenin gerilme direncinin en yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Mekanik özelliklerin incelenmesi için, sıkıştırma ve germe uygulamalarına dayalı fonon frekanslarının titreşimini inceleyecek yeni bir metod geliştirilmişti [51]. Raman spektroskopisi tek eksenli gerilme ve hidrostatik stress altında fonon frekanslarını izleyebilen bir tekniktir. Titreşimsel frekans modunun azalmasından dolayı gerilme stresi fononların yumşamasına sebep olmuştur. Buna karşın sıkışma stresi (hidrostatik), titreşimsel frekans modunun giderek artmasından dolayı fononların sertleşmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden grafende, gerilmenin bir fonksiyonu olarak fonon frekansının titreşimlerini incelemek alttaşı temelli grafenlerin atomik seviye etkileşimleri ve bireysel bağlardaki stress iletimi üzerine yararlı bilgiler sağlamaktadır [52]. Grafen tabakadaki sıkıştırma ve gerginlik kuvveti, uygulanan stresle G ve 2D piklerindeki değişimlerin izlenmesiyle Raman spektroskopisi kullanılarak hesaplanmıştır. Gerginliğin artmasıyla, G piklerinde ayrılma ve kırmızıya kayma gözlenmiştir. Buna karşın 2D piklerinde ayrılma olmaksızın kırmızıya kayma gözlenmiştir [53].

Bunlardan başka SiC üzerine büyütülen grafenlerde karşıt bir davranış gözlenmiştir [50]. Büyütülmüş grafende, mikromekaniksel yolla üretilen grafenden farklı olarak bütün Raman bantları maviye kaymıştır. Bu farkın sebebi, SiC üzerine büyütülen grafenin büyütme esnasında sıkışmaya maruz kalmasıdır. Bunun yanında grafendeki gerginlik elektronik bant yapısını değiştirebilir ve enerji bant aralığı kontrollu bir gerginlikle ayarlanabilmektedir. Son zamanlardaki çalışmalarda, tek eksenli gerginlik altında bant aralığının ayarlanabileceği ortaya konmuştur [52]. Bu bant aralığı tek tabaka grafen için en yüksek gerginlik de yaklaşık 0.25 eV olarak olarak

saptanmıştır. Ayrıca tek eksenle uygulanan gerilimin C-C bağlarını kırarak grafenin elektronik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğide öne sürülmüştü.

2.4 Grafenin Termal Özellikleri

Termal yönetim, elektronik unsurların güvenilirliği ve daha iyi performansı için anahtar bir faktördür. Bilindiği üzere ısıнын büyük bir miktarı aletin çalışması esnasında oluşmaktadır. Grafit, elmas ve karbon nanotüpler gibi karbon allotropları güçlü bir kovalent bağa ve fonon saçılmasına sahip olduklarından dolayı en yüksek termal iletkenliğe sahip oldukları bilinmektedir. Başlangıçta, karbon nanotüplerin 3000 W/mK (çok duvarlı karbon nanotüpler için) [54] ve 3500 W/mK (tek duvarlı karbon nanotüpler için) [55] değerlerinde en yüksek termal iletkenlik değerine sahip oldukları düşünülmekteydi. Ancak karbon nanotüplerdeki büyük termal kontak direnci karbon nanotüp temelli yarıiletkenler için esas problem olan konu olmuştur. Son zamanlarda yapılan çalışmada en yüksek termal iletkenlik 5000 W/mK değeri ile tek tabaka grafenin olduğu tespit edilmiştir [56]. Farklı metotlarla üretilen grafenlerin termal iletkenliğinde farklı olduğu araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır [57]. Örneğin mikro mekanik yolla üretilen tek tabaka grafenlerin oda sıcaklığında termal iletkenliği 4840 – 5300 W/mK değerinde olmasına karşın askıda grafenlerin oda sıcaklığında 4100 – 4800 W/mK değerinde olduğu tespit edilmiştir. Grafenin termal iletkenliğini belirleme konusunda farklı bir metot daha kullanılmıştı. Bu metot da bir askıda grafen tabakası lazer ışığı ile ısıtılmıştı (lazer ışığının dalğa boyu 488 nm dir). sıcaklık değişimi, bir termometre gibi davranan konfokal mikro Raman spektroskopisi kullanılarak grafenin G pikindeki kayma ölçülerek belirlenmiştir [58].

Termal iletkenlik kenar kusurları [59], saçılmalar ve izotopik katkılar [60] gibi bazı faktörler tarafından etkilenmiştir. Genelde bütün bu faktörler termal iletkenliği olumsuz yönde etkilemiştir.

3. GRAFEN SENTEZLEME TEKNİKLERİ ve YÖNTEMLER

Bir önceki bölümde de söz edildiği gibi, grafit birbirlerine paralel istiflenmiş grafen tabakalardan oluşmaktadır [4]. Bir grafen düzlem içerisinde her bir karbon atomu sp^2 olarak yerleşip ve diğer üç karbon atomu ile kovalent bağ yaparak sürekli altıgen yapıyı oluşturmuştur. Buna karşın bitişik düzlemler çok daha zayıf olan Van der Waals kuvvetiyle bağlanmışlardır. Grafen tabakalar arası bu zayıf bağ, grafen tabakaların birbirleri üzerinden kolayca kaymasına izin vermektedir.

Grafen sentezleme teknikleri 4 ana yöntem altında toplanmak mümkündür.

1-Mekanik Ayrılma Yöntemi.

2- Alt Tabaka Temelli Metotlar.

a) Epitaksiyal Büyütme.

b) Kimyasal Buhar Depolama.

3- Çözelti Temelli Grafen Oksitin İndirgenmesi.

4 -Seçilmiş Çözeltiler İçinde Grafenin Ultrasonik İşleme Ayrılması.

3.1 Mekanik Ayrılma Yöntemi

Tek tabaka grafen ilk önce yığın grafitten mekanik yöntem kullanılarak A. Geim ve ark tarafından elde edilmiştir [4]. Bu tekniğin diğer bir adı da Selo bant yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Çünkü grafitin, tabakalarına ayrılması Selo bant aracılığı ile olmuştur. Bant vasıtasıyla ayrılan tabakalar optik mikroskop altında incelenmek üzere SiO_2/Si alttaş üzerine aktarılmıştır. Bu teknik sayesinde $100\ \mu m$ boyutlarına kadar yüksek nitelikli grafen elde edilebilmiştir. Bu nitelikler grafen özelliklerini incelemek için yeterli olmaktadır. Yüksek nitelikli tek tabaka grafenler bu yöntemle üretilmiş olmasına karşın grafen temelli aygıtlar üretimi için yeterli büyük alanlı grafen üretmekte bu teknik yetersiz kalmıştır. Buna karşın mekanik ayrılma yöntemi sadece düşük verimler için uygun olmaktadır. Bu teknikte yapışkan bantlardan başka maddeler kullanılarak da grafen üretimi gerçekleştirilmiştir [61-62-63]. Başka araştırma grupları tarafından Polydimethylsiloxane (PDMS) ve kalıplanmış altın filmler kullanılarak mekanik ayrılma yoluyla grafen üretimi sağlanmıştır. Mekanik yöntem

laboratuvarlarda temel araştırmalar için çok uygun olmasına karşın teknolojiye aktarılamamaktadır. Bu tezde elektriksel parametreleri incelenen grafenler mekanik ayrılma yöntemiyle elde edilmiş olup deneysel bölümde bu teknik üzerine daha kapsamlı bilgi sunulmuştur.

3.2. Alt Tabaka Temelli Metotlar

Alt tabaka temelli grafen sentezleme tekniklerinden biri, epitaksiyal büyütme yöntemidir [64]. Bu yöntemde bir vakum içerisindeki silisyum karbürün (SiC) ısıtılmasıyla en üsteki silisyum atomlarının kaçışına izin verilmiştir. En üsteki silisyum atomlarının kaçışından sonra geride kalan karbon atomları altıgen grafeni yeniden oluşturmuştur. Bu yöntemle grafen üretimi ultra yüksek vakum altında gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden bu yöntemin bazı dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık olarak 1500 °C) vakumu 10^{-10} torr luk ultra vakuma ulaştırmak çok zor olmaktadır. Yinede epitaksiyel büyütölmüş grafen, altın/polyimide filmler kullanılarak Si/SiO₂ veya başka alltttaşlar üzerine iletilebilmiştir. Bu teknik zor deneysel koşullarından ve üretilen grafenin niteliğinden dolayı çok tercih edilen bir yöntem değildir. Bu oluşum esnasında bazı atomik kusurlar ve kenar kusurları oluşma ihtimali olduğu için bu yolla üretilen grafen mekanik ayrılma yoluyla üretilen grafen kadar nitelikli olamamaktadır [65].

Alt tabaka temelli sentezleme tekniklerinden bir diğeri ise kimyasal buhar depolama yöntemidir. Grafenin kimyasal buhar depolaması, büyük alanlı birkaç tabaka grafen üretmek için kolay ve kontrol edilebilir bir epitaksiyal büyütme yöntemi olmuştur. Ayrıca bu yöntem karbon nanotüpler [66] ve çeşitli nano maddelerin [67] üretilmesinde çok kullanılan bir yöntemdir. Kimyasal buhar depolama tekniğindeki temel mekanizma şu şekilde olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bir hidrokarbon gazına maruz burakılan geçiş metali üzerinde karbon doyuma ulaşmakta ve film oluşmaktadır. Genellikle nikel filmler metan gazıyla birlikte kullanılmıştır. Bundan başka Cu (bakır), Co (Kobat), Pt (Platin), Ir (İridyum) gibi geçiş metalleri ile birlikte H₂ (hidrojen) ve C₂H₅OH (etil alkol) gibi gazlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu gaz molekülleri katilazör yüzey üzerine karbonun yeniden oluşmasında etkili olmaktadır. Ayrıca katalizörler, büyütme süreci boyunca karbon atomları için destekleyici bir rol

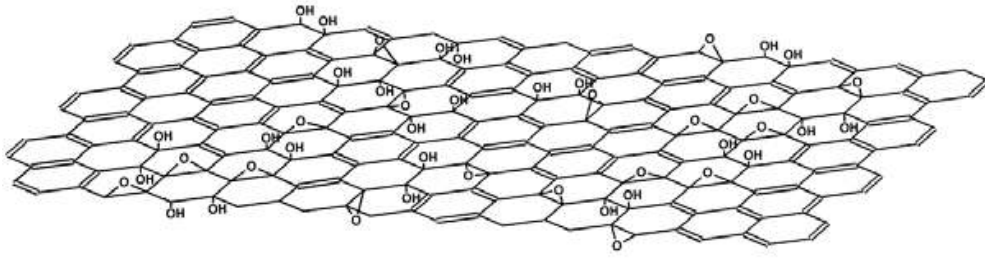
oynamaktadırlar. Katalizörün karbon çözünürlüğü epitaksiyal olarak büyüyen grafen tabaka sayılarının kontrol edilebilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca nikel üzerine grafenin kimyasal buhar depolama ile büyütülmesi bir karbon ayrılması [68] ve çökeltme [69] süreci iken, buna karşın bakır üzerine grafen büyütme, yüzey adsorpsiyonuna dayanan bir süreç olmuştur [70].

Nikelle katalize edilmiş bir süreçte, karbon atomları ilk önce metal ince film içinde yayılıp grafen adacıkları oluşturulup ve daha sonra yüzey üzerine çökeltiştir. Diğer taraftan bakır katalizördeki durumda, karbon atomları grafen tabakaları oluşturmak için yüzey üzerine bağlanmışlardır. Karbon atomlarının bakıra kolayca bağlanmasının ana sebebi bakırın düşük karbon çözünürlüğüdür. Metan gazı bakır yüzey üzerine yayılır yayılmaz birleşenlerine ayrılarak grafen adalarını oluşturmaya başlamaktadır. Bütün bakır yüzeyi grafen tabakalarla kaplandığı zaman, yüzey üzerindeki katalizör parçacıklar tükenip, karbon atomları artık bakır içerisinde çözünmez olmuşlardır. Bu durum karbon doyumunu göstermektedir. İşte bu yüzden bakır üzerine kimyasal buhar depolamayla grafen üretimi, büyük alanlar üzerine depolanan grafen tabakaların sayısını kontrol etmesi çok rahat olmuştur. Nikel filmlerin karbon çözünürlüğü bakıra göre çok daha yüksektir. Bu nedenle nikel üzerinde tek düzine grafen tabakaları üretilemez. Bu teknik sayesinde köşegen genişliği 30 inch olan tek tabaka dikdörtgen grafenler üretimi başarılmıştır [71]. Tek tabaka grafen üretimindeki bu gelişme ise grafen temelli makro elektronığı çok büyük ölçeklere ulaştırması beklenmektedir. Bu yöntem büyük alanlar üzerine grafen üretmekte çok daha güvenilir ve fiziksel olarak kontrol edilebilir olmasına karşın, hem çok pahalı hem de zor bir yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajı bugünkü çağdaş metal oksit yarıiletken teknolojisiyle yüksek uyum sağlamasıdır [72].

3.3. Çözücü İçerisinde Grafenoksitin İndirgenmesi

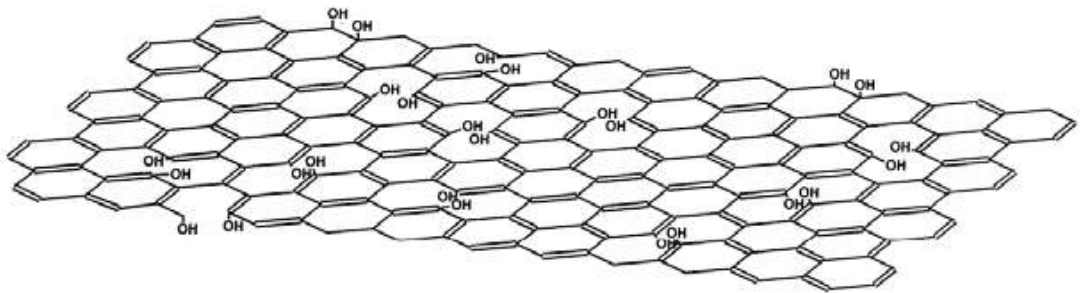
Bir diğer grafen üretme tekniği ise çözücü temelli grafenoksitin indirgenmesi tekniğidir. Bu metod da ham madde olarak grafit kullanılıp grafenoksitin kimyasal indirgenmesi sonucu büyük miktarlarda tek tabaka grafen üretilmektedir [73-74]. Bu teknikte grafenoksit (GO), bir çözelti içerisinde kararlı grafen dağılımı elde

etmek için bir ortam olarak kullanılmıştır. Grafenoksit, grafitin oksitlenmesinden üretilip ve grafitin orijinal katmanlanmış yapılarını içermektedir. Hidroksil, karbonil, karboksil işlevsel grupların büyük miktarlarının varlığından dolayı ana ve kenar düzlemler üzerine bağlanmışlardır [75-76]. Grafitoksit güçlü bir hidrofiliktir ve su içerisinde kararlı koloidal dağılım oluşturmak için kolayca ayrılabilir [77].



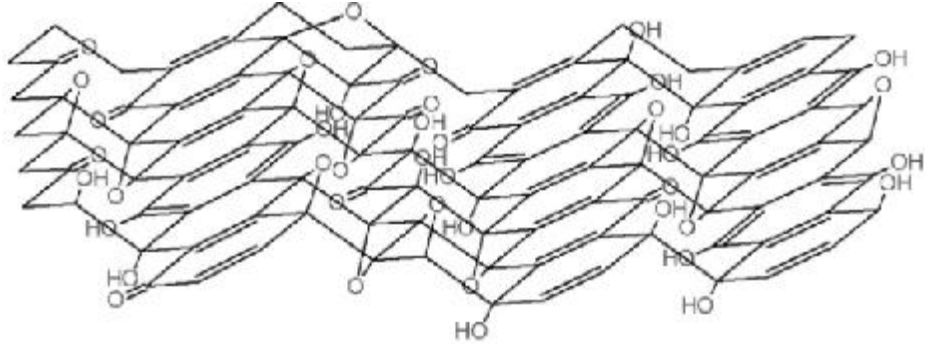
Şekil 3.1 Grafenoksitin kimyasal yapısı [77].

Oksidasyon sürecinde hidrofiliklik giderek artmaktadır. Bu durumda onun üstün elektriksel özellikleri gitgide kaybolup ve sonunda elektriksel olarak yalıtkan hale gelmiştir. Elektriksel iletkenliğini düzeltmek için grafenoksit, bir takım kimyasal süreçlerle grafene indirgenmeye çalışılmıştır. Grafitoksit elde edilmesi ve grafene indirgenmesi şu süreç takibinde gerçekleştirilmiştir.



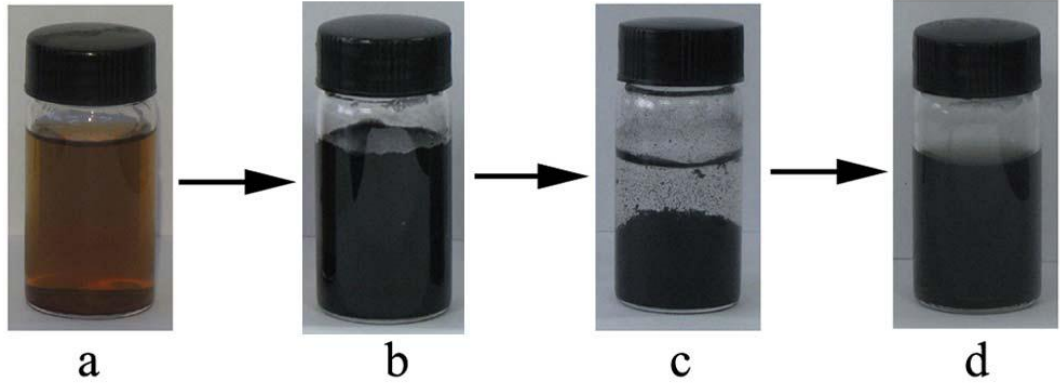
Şekil 3.2 Termal işlemden geçirilmiş grafenoksit [77].

Grafitoksitin, grafitten sentezlenmesinde Hummers metodu kullanılmıştır [78]. Hummers metodunda 2 gr grafit toz 0 °C sıcaklıkta 100 ml lik yoğunlaştırılmış H₂SO₄ içerisine konulmuştur.



Şekil 3.3 Grafenoksit için 3 boyutlu model [77].

Daha sonra karışımın sıcaklığı 10°C de tutulmak şartıyla 8 gr lık KMnO_4 yavaş yavaş eklenmiştir. Burada sıcaklığın 10°C üstüne çıkmamasına dikkat edilmiştir. Karışımındaki tepkime iki saat süresince 10°C sıcaklıkta devam ettirilmiştir. Bir sonraki aşamada ise karışımın sıcaklığı 35°C yükseltip ve bu sıcaklıkta bir saat boyunca karıştırılmıştır. Bunun sonrasında 100 ml saf su yavaş yavaş ilave edilerek karışım sulandırılmıştır. 100 ml saf su tamamen ilave edildikten sonra karışım bir saat daha karıştırılmıştır. Akabinde 300 ml saf su yine yavaş yavaş son karışıma eklenip ve bir saat boyunca yine karıştırılmıştır. Bu işlemlerden sonra geride kalan KMnO_4 çıkarmak için karışıma % 30 luk 20 ml H_2O_2 eklenmiştir. İşlemlerin sonucunda karışımdan büyük miktarlarda kabarcıklar çıkıp ve karışımın rengi açık sarı hale gelmiştir. Sonunda karışım filitrelenip ve metal iyonları çıkarmak için % 5 lik HCl nin 800 ml lik sulu çözeltisinde yıkanmıştır. Tamamen temizleme için 1 l saf su ile yaklaşık bir saat yıkanmıştır. En son aşamada ise oluşan katı 24 saat boyunca 60°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Bu işlem sonunda su buharı da tamamen uzaklaştırılıp ve grafitoksit tozu elde edilmiştir. Elde edilen grafitoksit tozlarından tek tabaka veya birkaç tabakalı grafen elde etmek için aşağıdaki süreç takip edilmiştir. 50 ml lik saf su içerisine 50 mg lık grafitoksit tozu konulup ve daha sonra bir saat boyunca orta şiddetli ultrasonik işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem sonunda kahverengi bir dağılım elde edilmiştir. Dağılımdaki grafitoksitleri (büyük parçaları) çıkarmak için 3000 rpm de 30 dakika boyunca santrifüje tabi tutulmuştur. Bu işlem sonunda GO nun kahverengi renkli homojen dağılımı elde edilmiştir. Grafitoksitin, tek veya birkaç tabaka grafene kimyasal olarak dönüşümü için son olarak bu homojen dağılımın 100 ml si 50 mg lık HMTA (Hexamethylenetetramine) ile karıştırılmıştır [79].



Şekil 3.4 a) Sıvı içerisinde dağılmış grafenoksit. b) Sıvı içerisinde dağılmış grafen. c) % 5 HCl eklendikten sonra grafen tozları. d) Grafen tozların yeniden su içerisinde dağılması [79].

Karışım 12 saat boyunca 100 °C sıcaklıkta karıştırıldıktan sonra çözeltinin rengi koyu siyah bir renge dönüşmüştür. Daha sonra çözelti, çok küçük parçacıklarında çökmesini sağlamak için 15 dakika boyunca 3000 rpm de yeniden santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen tek veya birkaç tabakalı grafenoksitler yapı olarak grafene benzemesine karşın elektriksel olarak grafenden çok uzaktadır.

Bu kimyasal dönüşüm sürecinden sonra bile elektriksel iletkenlikte en fazla % 15 lik bir iyileşme sağlanabilmektedir. Bu durum saf grafenle karşılaştırıldığında elektriksel iletkenlik için çok yetersiz olup temel anlamda grafenoksitinde yalıtkan olduğu söylenebilmektedir.

3.4. Seçilen Çözücü İçerisinde Grafen Üretimi

Bir diğer grafen sentezleme metodu ise, seçilen bir sıvı içerisinde grafenin direk olarak ayrılması yöntemi olup, 2008 yılında Y. Hernandez ve ark. [24] tarafından ortaya konulmuştur. Yukarıda bahsedilen sentezleme yöntemleri bazı dezavantajlarla gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi olan mekanik ayrılma yöntemi [4] yüksek alanlı grafen üretmek için yeterli bir metot değildir. Ayrıca mekanik ayrılma yöntemi laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmekte olup teknoloji dünyasına aktarılmasında sıkıntı yaşanmaktadır. Mekanik ayrılma yöntemi ile büyük alanlı grafen üretmek çok zordur. İkinci yöntem ise CVD (kimyasal buhar depolama) yöntemi [68] olup bu yöntem, büyük alanlı grafen üretimine izin vermektedir. Ancak bu yöntemde asıl sıkıntı grafenin metal bir alttaş üzerine büyütülmesidir. Bu durum, grafenli iletken bir

devre yapmak için yalıtkan bir alttaşa numunenin transfer edilmesini gerektirir ki bu mekaniksel bir transferle gerçekleştirilebilmektedir. Buda sıkıntılı bir durum oluşturmuştur. Son yöntem olan grafitoksitin [77] ilgili bir çözücü içerisinde ultrasonik işlem sonucunda ayrılmasıdır. Yukarıda da bahsedildiği gibi grafitoksit, grafen benzeri tabakalar içerip ve kimyasal olarak su içerisinde kararlı olan hidroksil ve karbonil işlevsel birleşikler içermektedir. Bu işlevsel gruplar grafenin elektriksel özellikleri önemli ölçüde bozmaktadır. Gerçekte grafenoksit bir yalıtkandır. Bu işlevsel gruplar yukarıda bahsedilen kimyasal işlemler sonrasında çıkarılabilmektedir. Lakin elektriksel özelliğinde kayda değer bir düzelme gözlemlenmemiştir. Bilim adamları yukarıda bahsedilen sentezleme tekniklerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için yeni bir teknik ortaya koymuşlardır. Bu teknikte grafit kovalent olmayan çözelti fazının içerisinde patlatılarak grafen tabakalara ayrılmıştır. Ayrıca bu teknik oksitlenmemiş, kusursuz ve önemli ölçüde nitelikli grafen üretmeye izin vermektedir [24].

Belli organik çözücülerin içerisinde grafit, ultrasonik patlatma sonucunda direk olarak grafen tabakalara ayrılmaktadır. Daha önceleri bu iş kimyasal çözücüler kullanılarak yapılmıştır. Stanford üniversitesinden H. Dai ve ark. [80] sülfirik asit ve nitrik asiti kullanarak ultrasonik ortamda patlatma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bu patlatma işleminin dezavantajları çok fazla olmaktadır. Asitle yapılan işlemler C-C ağı içerisinde bant ayrılmalarına sebep olmaktadır. Ayrıca asitle işlemde gerek kenarlarda gerekse hacim içinde önemli kusurlar (hem noktasal hem de çizgisel) oluşturmuştur. Buda grafenin elektriksel iletimini önemli ölçüde değiştirmektedir. Ayrıca bu yöntemde oluşan kusurlar hiçbir teknikle yok edilememektedir.

Y. Hernandez ve arkadaşlarının asıl merak ettikleri soru, acaba çözücülerin hangi özelliği grafiti tabakalara ayırabilmekteydi. Böyle ayrılmalar net enerji harcamasının çok küçük olduğu durumlarda gerçekleşmekteydi [81]. Kimyada bu denge enerjisi olarak bilinmekte ve şu şekilde ifade edilmekteydi. Enerji dengesi, birim hacimdeki karışımın entalpisidir. Enerji dengesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{VH_{min}}{V_{min}} \approx \frac{2}{T_{flake}} (\delta_G - \delta_{so}) \phi \quad (3.1)$$

Burada $\delta_i = \sqrt{E^i}$ i fazlı yüzey enerjisinin kareköküdür. T_{flake} grafen tabakanın kalınlığıdır. $\emptyset$ grafen tabakanın hacim kesridir. Hildebrand Scratchard denklemi [82] karışımın entalpisinin çözücü ve grafenin yüzey enerjilerinin dengesine bağlı olduğunu göstermiştir. Grafit için yüzey enerjisi, iki grafen tabaka arasındaki Van der Waals kuvvetini aşmak için gerekli olan birim hacim başına enerji olarak belirlenmiştir [83]. Ayrılmanın gerçekleşebilmesi için, çözücünün minimum yüzey enerjisinin grafenin yüzey enerjisine eşit olması gerekmektedir. Deneysel aşamaya gelindiğinde ilk önce grafit toz 0.5 mm lik süzgeçlerden geçirilerek büyük parçacıklardan arındırılmıştır. Daha sonra grafit tozları 10 – 15 ml çözücü içinde 0.1 mg/ml lik konsantrasyonlarda ilgili çözelti içinde dağıtılmıştır. Elde edilen çözelti çok düşük güçte ultrasonik banyoda belli bir süre tutulmuştur. Çözelti koyu gri bir renk almaktadır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken konu, ultrasonik banyonun kuvveti çok büyük olursa grafit tabakalarına ayrılma yerine kırılmaya başlamaktadır. Ultrasonik banyo işleminin ardından bu çözelti 5000 rpm de 90 dakika boyunca santrifüjde bekletilmiştir. Bu işlemin amacı ayrılmamış grafit parçaların dibe çökmesini sağlamak ve ayrılan grafen tabakaların yüzeye çıkmasını sağlamaktır. Bir sonraki aşamada ise çözücünün çıkarılması aşamasıdır. Bunun için çözelti 4 saat süresince 400 °C de gaz altında tavlansmıştır.

Bu aşamadan sonra çözücü tamamen uzaklaştırılır ve tek veya birkaç tabaka grafen elde edilmiş olmaktadır. Çözücülerin yüzey gerilimlerinin farklı olması, santrifüj sonrası kalan grafen/grafit oranı etkilemektedir. Bu durum farklı çözücülere göre tablodaki gibi olmaktadır. Organik çözücü içerisinde grafiti patlatma yöntemi çok yönlü olup alanı büyütülebilir ve grafen temelli kompozit ve film üretiminde kullanılabilir. Mikro elektronik uygulamalar içinde bu yöntemle üretilen grafenler kullanılabilir.

Tablo:3.1 Santrifüj sonrası kalan Grafen/Grafit yüzdesi ve yüzey gerilimine göre en iyi çözücüler [24].

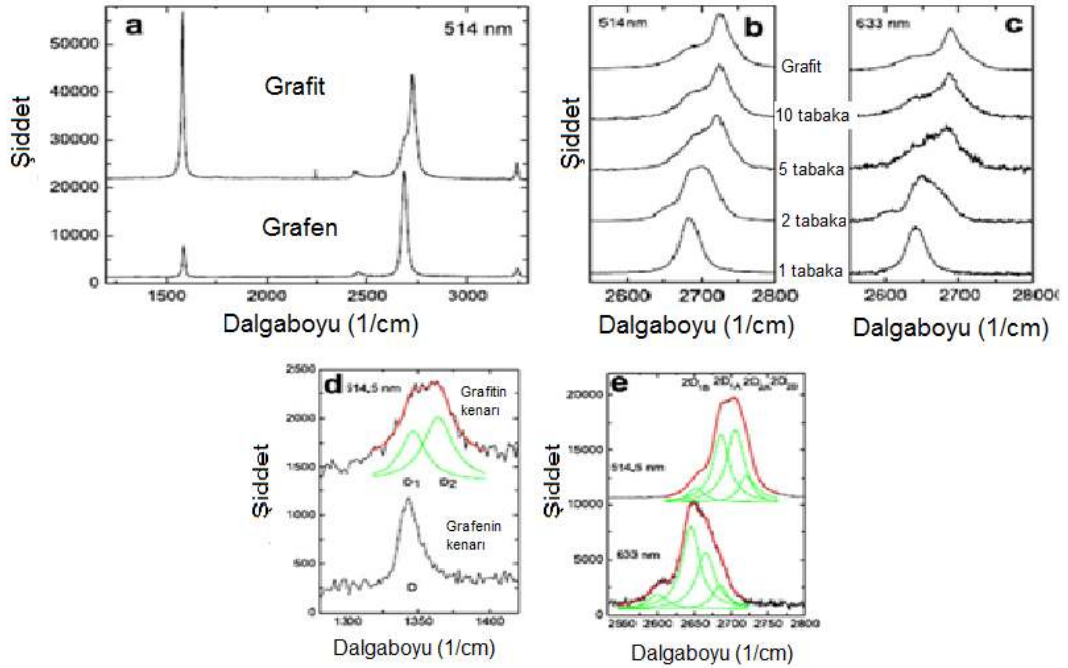
Çözücü	Yüzey gerilimi (mJ/m ²)	Santrifüj sonrası % kalan	Hata
Benzyl benzoate	45.95	8.3	1.1
NMP(1-Methyl-2-pyrrolidinone)	40.1	7.6	1.7
GBL (δ -Butyrolactone)	46.5	7.6	1.7
DMA (N,N-Dimethylacetamide)	36.7	7.2	1.4
NVP (1-Vinyl-2-pyrrolidinone)	42.7	6.6	2.1
N12P(1-Dodecyl-2-pyrrolidinone)	34.5	5.4	1.5
DMF(N,N,-Dimethylformomide)	37.1	4.5	1.6
DMSO (Dimethyl sulfoxide)	42.98	4.1	1.0
IPA (İsopropanal)	21.66	3.4	0.6
Acetone	25.2	2.5	0.8

3.5 Raman Spektroskopisi

Raman Spektroskopisi, genellikle bir lazer kaynaktan oluşan tek kromatik ışığın esnek olmayan saçılmasına dayalı spektroskopik bir tekniktir. Burada esnek olmayan saçılma, tek kromatik ışıktaki bulunan fotonların frekansının numune ile ışığın etkileşimi sırasında değişmesi anlamına gelmektedir. Lazer ışığın fotonları numune tarafından önce absorbe edilip daha sonra tekrar salınmaktadır. Tekrar salınan fotonların frekansları ilk baştaki tek kromatik ışığın frekansıyla karşılaştırıldığında aşağı veya yukarı kaymalar olduğu gözlenmektedir. Bu durum Raman etkisi olarak isimlendirilmektedir. Bu kaymalar, molekül içerisindeki titreşimler ve düşük frekanslı geçişler hakkında bilgi vermektedir. Bundan dolayı Raman Spektroskopisi katı, sıvı ve gaz numunelerin incelenmesinde kullanılabilmektedir [84-85].

Karbon allotroplarının elektronik bantlarındaki yüklerinden dolayı 1350 cm⁻¹, 1580 cm⁻¹, 2700 cm⁻¹ değerleri civarında sırasıyla G, D ve 2D piklerine sahip oldukları

bilinmektedir [86]. Bu piklerin izleri raman spektroskopisi altında gözlemlenebilmektedir. Piklerin özelliklerinin belirlenmesi grafenin tabaka sayısı açısından karakterize edilmesini sağlamıştır. Dahası bu piklerin durumu yapı içindeki kusurlar, sıcaklık ve gerginliğin etkisi, katkı konsantrasyonu hakkında bize bilgi vermişlerdir. D. Graf ve ark. [16] yapmış olduğu çalışmada grafen tabaka sayısını G ve 2D piklerinin durumlarına bağlı olarak ortaya koymuşlardır. Çalışmaya göre tek tabaka grafenlerde 2D piki, G pikinden daha büyük ve daha keskin bir pike sahip buna karşın çift tabaka grafende G piki 2D pikinden daha büyük ve 2D piki daha geniş olmaktadır. G bandı, Brillouin bölgesinde iki kez dejenere olmuş fonon moduyla ilişkilidir. Bu bant, sp^2 karbon atomlarının düzlemdeki titreşimlerinden dolayı oluşmuştur. Buna karşın 2D bandı, D bandını hemen hemen çift frekansıdır ve Raman saçılma sürecinde ikinci saçılmadan başlamıştır.



Şekil 3.5 a) Grafit ve tek tabaka grafenin Raman spektrumlarının karşılaştırılması. (b) 514 nm dalga boyu için, tabaka sayısının bir fonksiyonu olarak 2D bandındaki değişimler. (c) 633 nm dalga boyu için tabaka sayısının bir fonksiyonu olarak 2D bandındaki değişimler. (d) Grafit ve tek tabaka grafenin 514 nm dalga boyundaki D bandının karşılaştırılması ve grafit için D bandının iki kısma (D₁ ve D₂) ayrılması. e) İki tabaka grafen için D bandı dört kısma ayrılması [86] .

D bandı atomik dizinin içindeki düzensizliklerin varlığından veya grafenin kenar kusurlarından, içindeki dalgalanmalardan, yük gölcüklerinden dolayı görülmektedir.

Grafit ile bir ve birkaç tabaka grafenin raman spektrumlarının karşılaştırılması aşağıdaki Şekil 3.5 deki gibi olmaktadır. Grafen tabakalardaki Raman Spektrumunda D pikinin görülmemesi grafen tabakalarda kusurların yokluğunu göstermektedir. Şiddet veya şekildeki önemli değişimler grafen ve grafitin için 2D bandında gözlemlenmiştir. Ferrari ve ark. [86] 2D bandının grafit için 2 parçaya iki tabaka grafen için 4 parçaya ayrıldığını gözlemlemişlerdi. Tabaka sayısı giderek arttığında 2D bandının şiddeti göreceli bir şekilde giderek azalmıştır. Tabaka sayısının artmasıyla grafenin rengi giderek maviye kaymaya başlamıştır. Tek tabaka grafenlerin tek keskin bir 2D pikine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tek tabakada bu pik, G pikinden yaklaşık olarak dört kat daha güçlü (şiddetli) olduğu tespit edilmiştir.

Grafenin özellikleri, tabaka sayısı ve temizliğine önemli ölçüde bağlı olduğu için bir çok araştırmacı tek veya birkaç tabaka grafenin niteliklerinin kontrolü ve incelenmesi için zararsız bir alet olan Raman spektrumunu kullanmışlardır. Raman spektroskopisi, tabaka sayısının belirlenmesinde, tabaka içindeki kusurların ve gerginliğin belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [24].

3.6 Litografi

Litografi, en temel anlamda resist olarak isimlendirilen ince bir film üzerine desenlerin basılması olarak ifade edilmektedir. Litografinin çeşitli teknikleri mikro alet veya radyasyon kullanılmasına göre sınıflandırılmaktadır (fotolitografi, elektron-litografi vb.). Bu yüzden desenlerin basılması için fotolitografide fotonlar, elektrolitografi de ise elektronlar kullanılmaktadır [87].

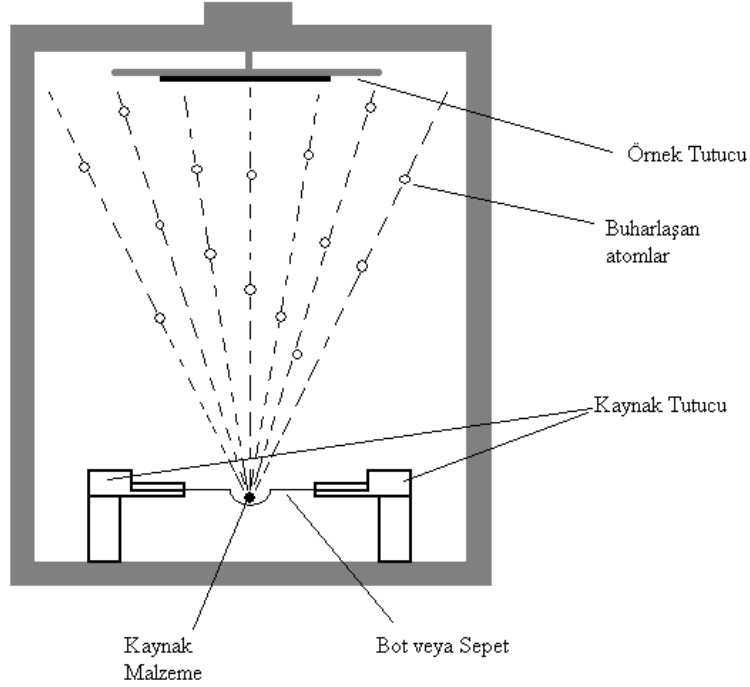
Diğer taraftan litografide sert kalıp ile yumuşak resist tabaka arasında mekaniksel etkileşimler kullanılmıştır [88]. Bu tür litografide resist yüzeyle kalıp arasında etkileşimin çeşitli tipleri (elektiriksel, mekaniksel, termal ve optiksel) kullanılmıştır. Bunlar arasında optik litografi en temel ve ilk litografi tekniği olup yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [89]. Optik litografide ilk aşamada bir negatif fotoresist bir alttaş üzerine döndürülerek kaplanır. Döndürme işlemi ilk etapta yavaş olup resistin alttaş yüzeyine tümüyle dağılması sağlanarak, ikinci etap da daha hızlı döndürülerek resistin homojen dağılımı sağlanmaktadır. Daha sonraki aşamada çözücüyü yüzeyden

buharlaştırmak ve net film kalınlığını elde etmek için numune bir ısıtıcı üzerine belirli bir sıcaklıkta yeterli süre bekletilmektedir. Bilindiği gibi nanoteknoloji adı verilen tüm teknolojilerde kullanılan boyutlar 100 nm ve daha altındadır. Geleneksel silikon teknolojisinde kullanılan optik litografi yöntemleri bu boyutları içeren aygıtlar yapmakta yetersiz kalmaktadır. Bu durumda nanoyapıları üretmek için yeni fabrikasyon teknolojilerinin gelişmesi gerekmektedir. Optik litografi temelli silikon teknolojisinin yetersiz kalması ile nanoyapılar içeren nanoelektronik temelli tümleşik entegre devrelerin yapımında elektron demet nanolitografi sistemleri kullanılmaktadır. Elektron demet litografisi yöntemi günümüzde nanoyapıların üretiminde en yaygın olarak kullanılan teknolojidir ve ilerde hızla gelişmesi beklenmektedir. Elektron dalga boyunun 0.1-1nm mertebesinde olması sayesinde, elektron demetlerini 1nm boyutlarında odaklamak teorik olarak mümkündür. Bu şekilde odaklanmış elektron demeti ile uygun fotorezist malzemeleri kullanarak nanoyapılar yapmak mümkün olmaktadır. Elektron demet nanolitografi sistemleri nanoelektronik devrelerin üretimi yanında nanofotonik, nanomanyetizma ve diğer şekillendirilmiş nanoyapılar gerektiren tüm nanoteknolojilerde önemli bir temel teknoloji olmaktadır. Bu nedenle bu tür temel bir teknolojinin ülkemizde yer alması çok önem taşımaktadır. Litografi yöntemleri, geçmişte olduğu gibi bugünde teknolojinin çok önemli bir süreci olmaktadır.

3.7 Termal Buharlaştırma Sistemi

Termal buharlaştırma sistemleri, mikro ve nanofabrikasyon süreçlerinde örneklerin yüzeylerine metal kaplama yapmak üzere kullanılmaktadır [90]. Bu sistemlerde genellikle yüksek buhar basıncına sahip ve kolay kontamine edilen metaller termal yöntemle buharlaştırılmaktadırlar. Termal buharlaştırma sistemleriyle alttaşlara homojen metal kaplamalar yapmak mümkün olmaktadır. Termal buharlaştırma sistemlerinin genel çalışma prensibi ise en basit şekliyle aşağıda ifade edildiği gibi olmaktadır. Cihazın kaynak tutturucularına takılan genellikle tungsten bot veya sepetlerin içerisine yerleştirilen kaynak metaller, bu bot veya sepetten geçirilen yüksek akım sayesinde oluşan yüksek sıcaklık sayesinde buharlaşmaktadırlar. Buharlaşan malzeme, vakum kazanı içerisinde bulunan kaynakların üzerinde yerleştirilmiş örnek tutucuya sabitlenmiş örnek üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Yoğunlaşma esnasında homojenlik, kaplama kalitesi açısından önem arz etmektedir.



Şekil 3.6 Buharlaştırma sisteminin şematik çizimi [90].

Bu yüzden bu sistemlerde, malzeme buharlaşması esnasında örnek tutucu hafif bir şekilde döndürülmektedir. Yine bu sistemlerde numune üzerindeki kaplama kalınlığı kuartz kristal osilatörü yöntemi ile kaplama esnasında rahatlıkla ölçülmektedir. Termal buharlaştırma sistemlerin de genellikle vakum seviyesi minimum 1×10^{-4} torr iken maksimum 1×10^{-8} torr civarında metal buharlaştırmalar yapılmaktadır.

3.8 Hesaplamalar

3.8.1. Mobilite Hesabı

Mobilite, bir elektrik alan içerisinde bir parçacığın nasıl hareket edebileceğini tanımlamaktadır. Başka bir deyişle, bir elektrik alan altında yük taşıyıcılarının hareket edebilme kabiliyetidir [91]. Elektrik alandan dolayı kristaldeki yük taşıyıcılar ivmelendiğinden hızları artmaktadır. Parçacıklar düşük elektrik alanlar için elektrik alanla direkt orantılı olan bir ortalama sürüklenme hızı kazanmaktadırlar. Bu nedenle

hol ve elektron mobilitesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedirler.

$$\vartheta_{dp} = \mu_p E \quad (3.2)$$

Burada ϑ_{dp} hol için ortalama sürüklenme hızı, E elektrik alan ve μ_p ise hol mobilitesi olarak tanımlanmaktadır. Elektron için ise;

$$\vartheta_{dn} = -\mu_n E \quad (3.4)$$

Burada ise ϑ_{dn} elektron için ortalama sürüklenme hızı ve μ_n elektron mobilitesi olarak tanımlanmaktadır. Elektron negatif yüklü olduğundan dolayı, elektronun net hareketi uygulanan elektrik alan yönüne zıt olmaktadır. Mobilitenin birimi genellikle cm^2/Vs olarak ifade edilmiştir. Grafendeki, elektrik alandan kaynaklanan taşıyıcı mobilitesi ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [4].

$$\mu = \frac{\Delta \sigma (V_g)}{\Delta n e} \quad (3.5)$$

(3.5) de σ iletkenlik, e elektron yükü, V_g kapı gerilimi ve n taşıyıcı konsantrasyonu olarak ifade edilmiştir. Taşıyıcı konsantrasyonu, uygulanan kapı gerilimi ile belirlenip şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\Delta n = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \Delta V_g}{t e} \quad (3.6)$$

Burada ε_0 boşluğun elektrik sabiti ve ε ise SiO_2 tabakasının elektrik sabitidir. t ise SiO_2 tabakasının kalınlığıdır (285 nm). Ayrıca iletkenlik ile öz direnç arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı bulunmaktadır.

$$\Delta \sigma = \frac{1}{\Delta \rho} \quad (3.7)$$

Son ifade, (3.5) de yerine yazılırsa

$$\mu = \frac{1}{(\Delta \rho) (\Delta n) e} \quad (3.8)$$

mobilité bu şekilde bulunmaktadır. Yine (3.6) de son bulduğumuz ifade de yerine yazılırsa,

$$\mu = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\Delta V_g}{t} \Delta \rho} \quad (3.9)$$

Ayrıca

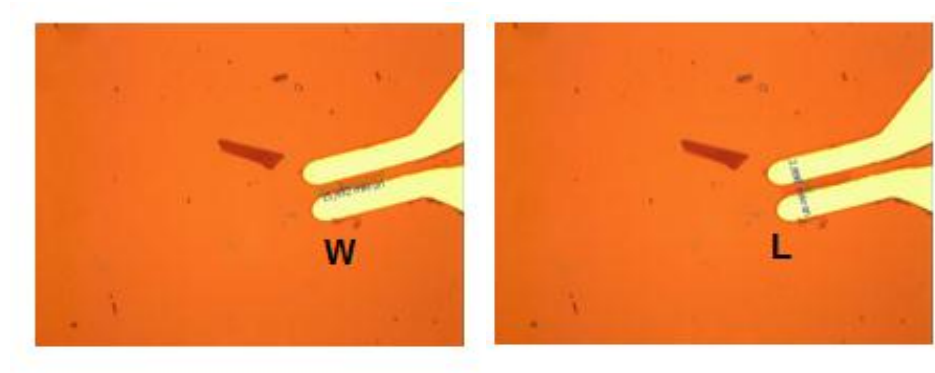
$$R = \rho \frac{L}{W} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{V_{ds}}{I_{ds}} \quad (3.11)$$

olduğu bilinmektedir. Buradan hareketle özdirenç,

$$\Delta \rho = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_{ds}} \left(\frac{W}{L} \right) \quad (3.12)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Burada L grafenden kontak alınan iki elektrot arasındaki mesafedir. W ise elektrodların bastığı grafenin uzunluğudur. Şekil 3.7.1 de optik görüntüsü bulunan grafen numunede $W = 15.10 \mu m$ ve $L = 2.90 \mu m$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.7 Grafen numunenin optik görüntüsü.

Son olarak (3.12) de bulunan ifadenin (3.9) de yerine yazılması durumunda elektrik alan mobilitesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right) \left(\frac{\epsilon \epsilon_0}{t}\right) \frac{\Delta V_g}{\Delta I_{ds}}} V_{ds} \quad (3.13)$$

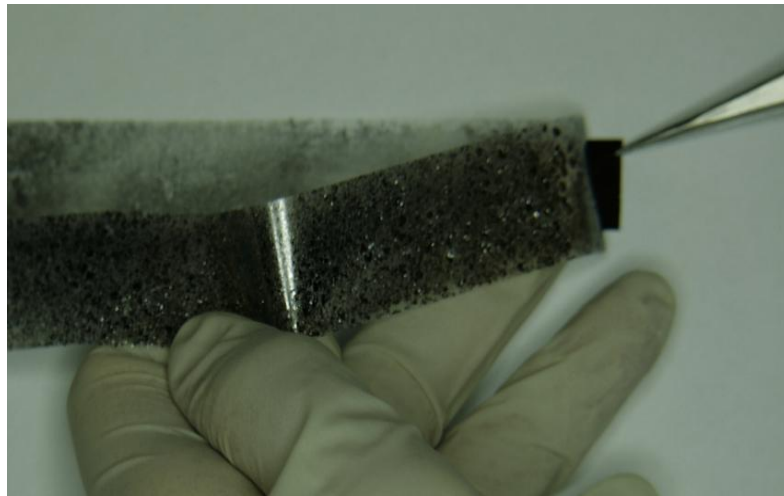
(3.13) de ifade edilen formül sayesinde grafendeki elektron ve hol mobiliteleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir [4].

4. DENEYSEL KISIM

Tez çalışmasındaki temel amacımız, grafen numunelerin farklı ortamlardaki (atmosfer, vakum, nem ve sıcaklık) elektriksel karakteristiğinin incelenmesi olmuştur. Elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi için HOPG ve Kish grafitlerden mekaniksel yöntemle üretilen grafen numunelerden grafen tabanlı alan etkili transistörler yapılmıştır. Yapılan bu transistörler sayesinde grafen numunelerin atmosfer ve vakum ortamlarında I_{ds} - V_{ds} ölçümleri ve I_{ds} - V_g ölçümleri alınmıştır. Yine grafen tabanlı alan etkili transistörler kullanılarak numunelerin nem ortamında ve farklı sıcaklıklar altında I_{ds} - V_{ds} ölçümleri ve I_{ds} - V_g ölçümleri alınmıştır. Gerek I_{ds} - V_{ds} grafiği gerekse I_{ds} - V_g grafiği kullanılarak her bir grafen numunenin mobiliteleri hesaplanmıştır. Kullanılan grafen numunelerin kalınlığını tespit etmek amacıyla Raman Spektrumları alınmıştır.

4.1 Numunenin Hazırlanması

Deneylelerimizde alan etkili transistör yapımında kullanılan grafenler, mekanik ayrılma yöntemiyle yüksek yönelimli pirolitik grafit (HOPG) veya Kish grafit den elde edilmiştir. Grafen üretiminde ilk aşamada, HOPG veya Kish grafit bir Selo bant üzerine uygun miktarda konulmuştur. Daha sonra grafiti ince tabakalarına ayırmak için bant defalarca yapıştırılıp açılmıştır.



Şekil 4.1 SiO₂/Si tabaka üzerine grafenin aktarılması [92].

Bu aşamada dikkat edilmesi gereken konu ise, bantla yapılan işlem çok fazla tekrarlanması halinde oluşan tek veya birkaç tabaka grafen tabakaların boyutsal olarak giderek küçüldüğü görülmüştür. Bu işlem genelde bandın yüzeyi, pürüzsüz bir yüzeymiş gibi görünene kadar yapılmıştır. Bir sonraki aşamada, bant yüzeyindeki grafen tabakalar ve farklı tabakalara sahip grafitler 285 nm SiO₂ kaplı Silisyum alttaş üzerine aktarılmıştır. Alttaşın yüzeyindeki tek tabaka grafenlerin yerini belirlemek için dijital kameralı bir optik mikroskop kullanılmıştır. Optik mikroskobun 100X büyütme sağlayan merceği altında incelemeler yapılmış ve tek tabaka grafen açık turuncu renkte görülmüştür. Tabaka sayısı arttıkça görünen renk mavi bir tona doğru kaymıştır. Yine optik mikroskop kullanılarak bulunan grafenlerin yüzey alanının, boyunun ve genişliğinin ölçüsü tespit edilmiştir.

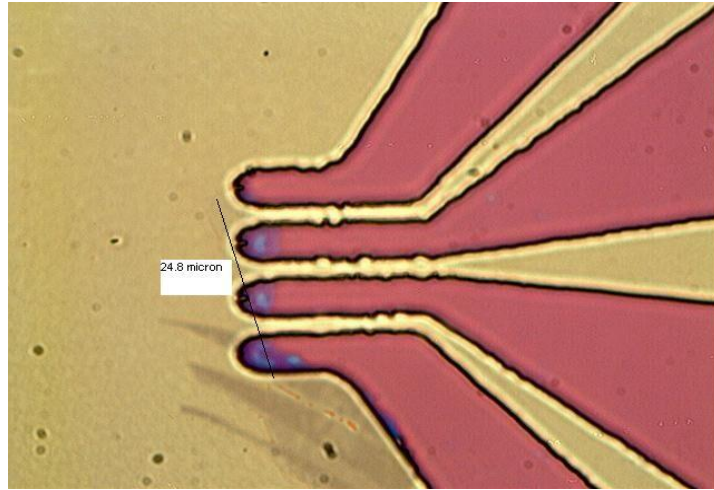


Şekil 4.2 Optik mikroskobun 100X merceği altında HOPG den elde edilen grafenin görüntüsü.

Bir sonraki aşamada yeri tespit edilen grafen tabakalar optik litografi yapmak için AZ 5214E fotorezist kullanılıp dönel kaplama cihazında kaplanmıştır. Fotorezist kaplandıktan sonra 100 °C de bir dakika boyunca ısıtıcı üzerinde bekletilmiştir. Daha sonra maske deseni basılmıştır. Maske basılı halde 40 sn kadar UV ışık altında bekletilmiş ve ardından tekrar ısıtıcı üzerinde 115 °C de 2 dakika bekletilmiştir. Son olarak 45 sn UV ışık altında maskesiz olarak bekletilmiştir.



Şekil 4.3 Optik mikroskobun 100X merceği altında Kish grafitten elde edilen grafenin görüntüsü.



Şekil 4.4 Grafen numunenin litografi işlemi yapıldıktan sonraki optik görüntüsü.

Maske ile basılan uygun şeklin açılması için AZ 726 MIF (Tetramethyl-Ammonium Hydroxide Solution) çözücü kullanılmıştır. Çözücü içerisinde yaklaşık olarak bir dakika kadar bekletilmiştir. Bu aşamadaki en büyük sıkıntı grafene basan kolların açılmamasıdır. Bazende bunun tam tersi olup kollar tamamen kalmaktadır. Her iki durumda da deney başarısız olmaktadır.

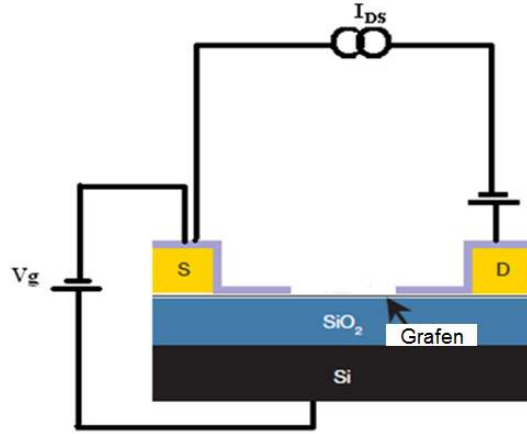


Şekil 4.5 Elektriksel kontakları alınmış grafen numunenin görüntüsü.

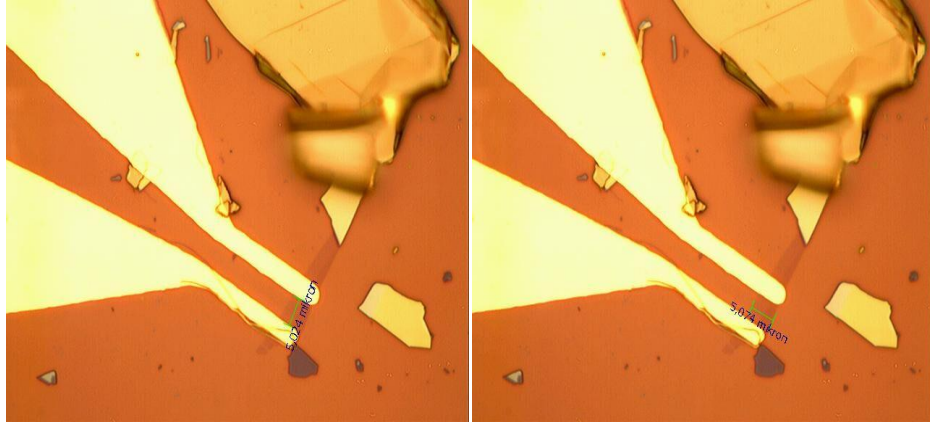
Bir sonraki aşamada ise elektriksel kontak almak için maske ile basılan şekil üzerine metal buharlaştırma ünitesi kullanılarak metal buharlaştırması yapılmıştır. Elektriksel kontaklar için krom ve altın kullanılmıştır. Numune, ünite içerisinde hedefe yerleştirildikten sonra altının yüzeye daha iyi tutunması için altına bir miktar krom buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma genelde 10^{-7} torr basınç altında gerçekleştirilmiştir. Buharlaştırma işlemi tamamlanan numuneler bir sonraki işlem olan lift-off için beş dakika kadar aseton içinde bekletilmiştir. Aseton sonrasında on dakika kadar metanol ve hemen sonrasında bol miktarda saf su içinde bekletilmiştir. Numune tamamen kurutulup elektriksel ölçüme hazırlanmıştır.

4.2 Elektriksel Ölçüm

Daha önceden de bahsedildiği gibi grafen numunelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için grafen tabanlı Alan Etkili Transistör (FET) yapılmıştır. Grafen sensörün ölçümü için Keithley 2612A Elektriksel ölçüm sistemi kullanılmıştır.

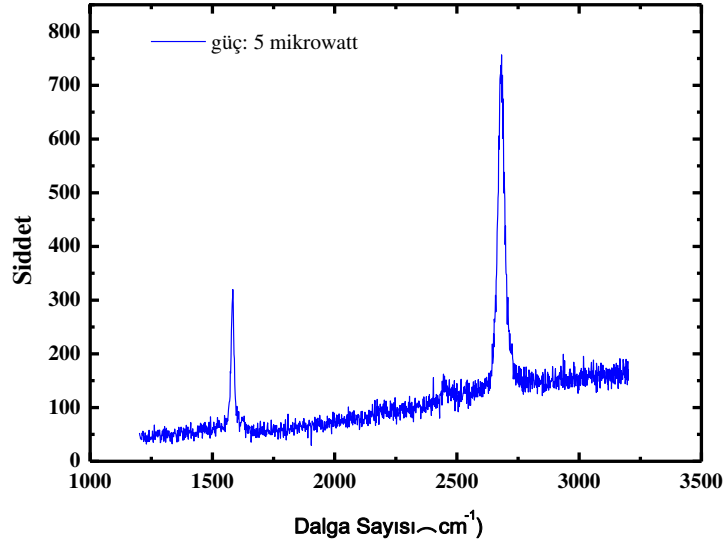


Şekil 4.6 Grafen sensör ölçümü için elektriksel bağlantıların görüntüsü.



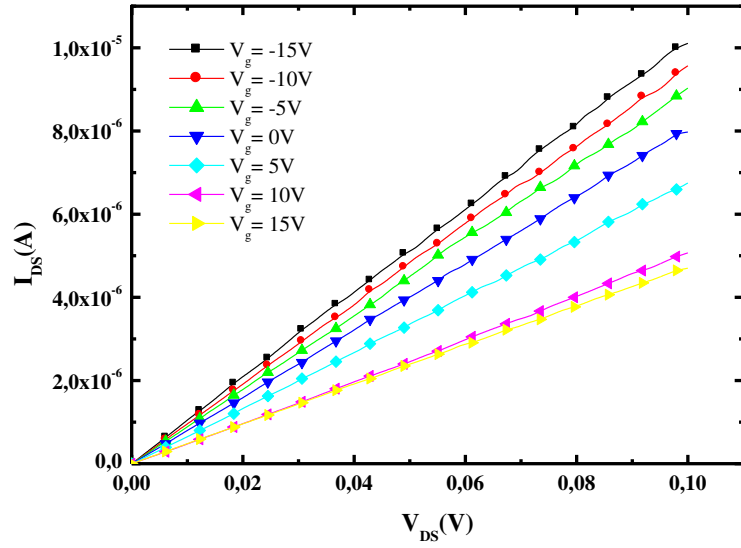
Şekil 4.7 Elektriksel kontak alınmış grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüleri.

Yukarıda, kish grafitten elde edilmiş Şekil 4.7 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin ölçümleri Keithley Elektriksel ölçüm sistemi kullanılarak sağlanmıştır. Şekil 4.7 deki numune üzerinden ölçümler atmosfer ortamında $V_{ds} = 0.1$ V ve $V_{ds} = 0.3$ V için ayrı ayrı alınmıştır.



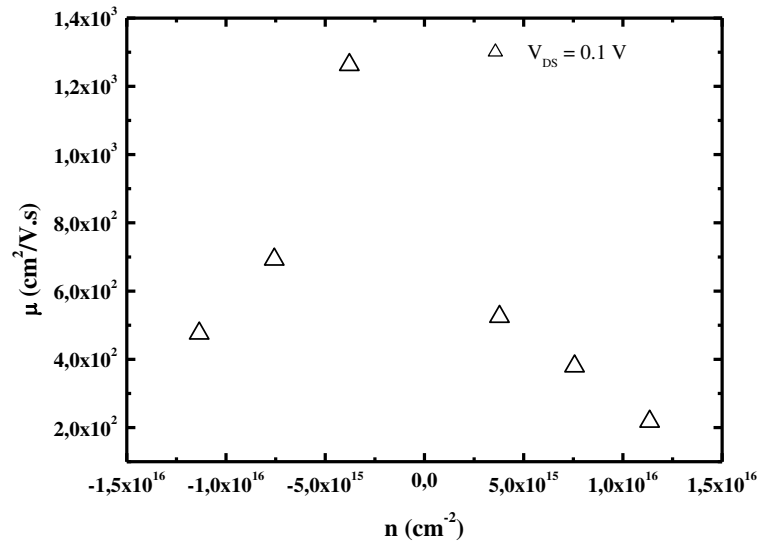
Şekil 4.8 Grafen numunenin Raman Spektrumu.

Şekil 4.7 de optik görüntüsü olan grafen numunenin tabaka kalınlığının tespiti için 514 nm dalga boyuna sahip lazer ışığı kullanarak Raman Spektrumu alınmıştır. Şekil 4.8 de bu numunenin Raman Spektrumu çizilmiştir. Grafik incelendiğinde 2D bandının G bandında daha büyük olduğu ve buna ek olarak 2D bandının keskin bir pik verdiği görülmüştür. Ayrıca atomik kusurlardan kaynaklanan D bandı görülmemiştir. Bütün bunlar Şekil 4.7 de optik görüntüsü olan grafen numunenin tek tabaka olduğunu ve atomik kusurlar içermediğini doğrulamaktadır [16].



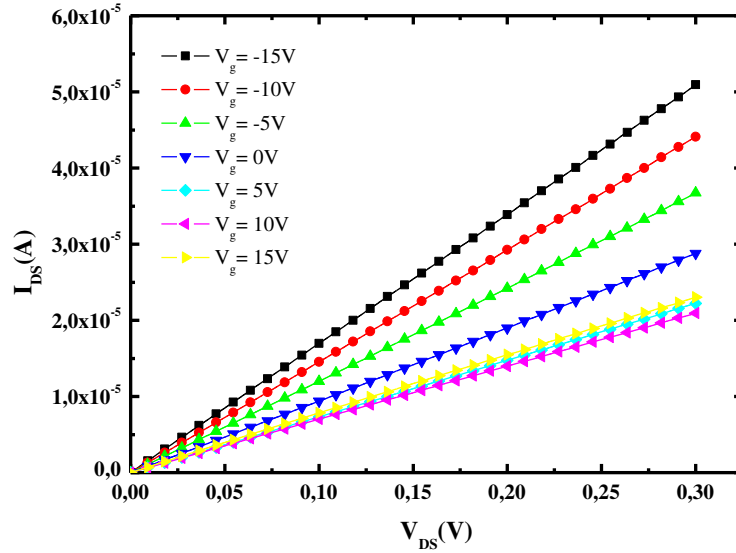
Şekil 4.9 Grafen numunenin atmosfer ortamındaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

Şekil 4.7 de optik görüntüsü olan grafen numunenin $V_{ds} = 0.1$ V için $V_g = -15$ V - 15 V aralığında atmosfer ortamında I_{ds} - V_{ds} ölçümü yapıp I_{ds} - V_{ds} grafiği Şekil 4.9 da çizilmiştir.



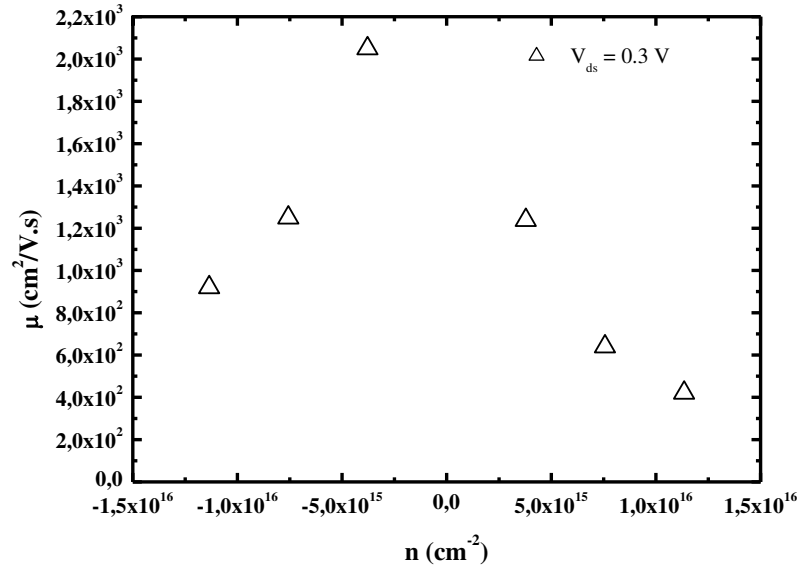
Şekil 4.10 Grafen numunenin atmosfer ortamındaki taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği.

Şekil 4.9 daki I_{ds} - V_{ds} grafiğinin eğiminden yararlanılarak mobilite hesabı yapılmıştır. En düşük hol mobilitesi $476 \text{ cm}^2/\text{V.s}$, en yüksek hol mobiliteside $1265 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulunmuştur. En düşük elektron mobilitesi $218 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulunurken, en yüksek elektron mobilitesi $525 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ bulunmuştur. Bulunan mobilite değerleri kullanılarak Şekil 4.10 da taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak mobilite grafiği çizilmiştir. Grafik incelendiğinde, gerek hol mobilitesinin gerekse elektron mobilitesinin artan taşıyıcı konsantrasyonuyla giderek azaldığı görülmüştür. Azalmanın nedeni, artan taşıyıcı konsantrasyonu durumunda taşıyıcıların birbiriyle olan etkileşimlerinin artması olarak düşünülmüştür. Bu durum mobilitayı azaltmıştır [4].



Şekil 4.11 Grafen numunenin atmosfer altındaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

Şekil 4.7 deki grafen numune için benzer V_g değerlerinde $V_{ds} = 0.3 \text{ V}$ için yine atmosfer ortamında I_{ds} - V_{ds} ölçümü yapıp I_{ds} - V_{ds} grafiği Şekil 4.11 de çizilmiştir. Bu grafiğin eğiminden yararlanılarak tekrar mobilite hesabı yapılmıştır.



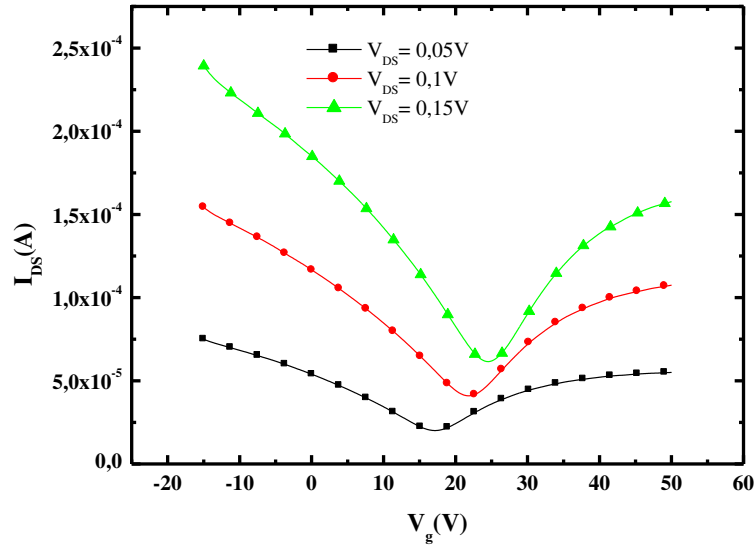
Şekil 4.12 Atmosfer ortamında taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği.

Şekil 4.11 deki I_{ds} - V_{ds} grafiğinden yararlanılarak Şekil 4.7 deki grafen numunenin mobilite hesabı yapılmıştır. Bulunan mobilite değerleri kullanılarak Şekil 4.12 de taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği çizilmiştir. $V_{ds} = 0.3$ V için en düşük hol mobilitesi $920 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ hesaplanırken, en yüksek hol mobilitesi $2025 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Buna karşın en düşük elektron mobilitesi $421 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ hesaplanırken, en yüksek elektron mobilitesi $1238 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Yine Şekil 4.10 dakine benzer şekilde taşıyıcı konsantrasyonunun artışı elektron ve hol mobilitelerini azaltmıştır. $V_{ds} = 0.3$ V olduğunda elektron ve hol mobilitesindeki artışın nedeni ise, grafen üzerinden akımın geçmesi sonucunda ısınmaya bağlı olarak mobilitayı olumsuz etkileyecek kirliliklerden numunenin arınmış olması olarak düşünülmüştür.



Şekil 4.13 Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.

Bir sonraki ölçümler yine kish grafitten elde edilen Şekil 4.13 de optik görüntüsü olan grafen numune üzerinden atmosfer ortamında alınmıştır.



Şekil 4.14 Grafen numunenin atmosfer ortamındaki I_{ds} - V_g grafiği.

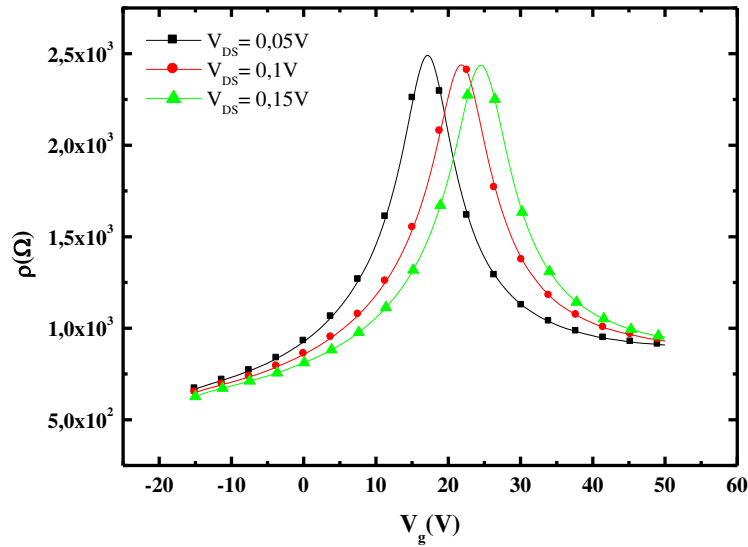
Grafen numunenin atmosfer ortamında farklı V_{ds} değerleri için I_{ds} - V_g ölçümü yapılmıştır. $V_{ds} = 0.05$ V, $V_{ds} = 0.1$ V ve $V_{ds} = 0.15$ V değerleri için I_{ds} - V_g grafiği şekil 4.14 de çizilmiştir. Grafik incelendiğinde, Dirac noktasının pozitif bölgeye doğru (sıfırın sağına) kaydığı gözlemlenmiştir. Dirac noktasındaki kaymaların nedeni, grafen numune üzerindeki kirliliklerden ısınmanın sonucu olarak grafenin

arındırılmış olması olarak düşünülmektedir. Ayrıca bu grafikte, grafenin üstün elektriksel özelliklerinden biri olan ambipolar alan etkisine sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Yani dışardan uygulanan bir gerilim sayesinde taşıyıcı tipi ve konsantrasyonu değişmiştir. İlk durumda yük taşıyıcıları boşlukken, Dirac noktasından sonra yük taşıyıcıları elektronlar olmuştur. Dolayısıyla taşıyıcı konsantrasyonu ve tipi dışardan bir müdahale ile ayarlanabilmiştir.[4].

Tablo 4.1: Grafen numunenin atmosfer ortamındaki farklı V_{ds} değerleri için hol ve elektron mobiliteleri.

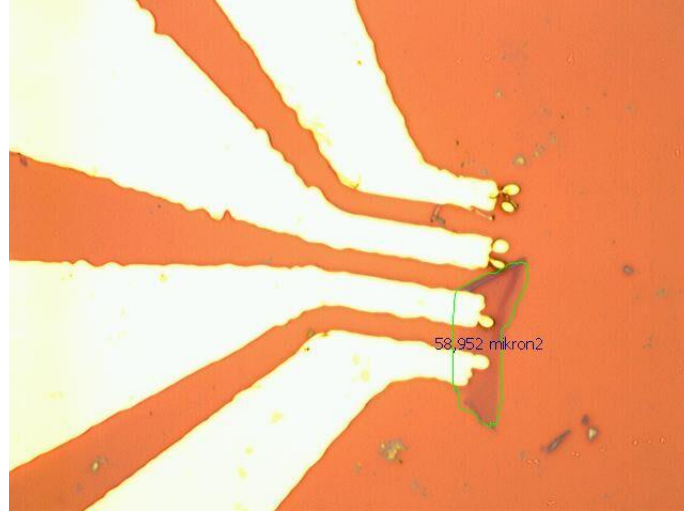
V_{DS} Değeri	Hol mobilitesi	Elektron mobilitesi
0.05 V	2459 $\text{cm}^2/\text{V.s}$	2168 $\text{cm}^2/\text{V.s}$
0.1 V	3033 $\text{cm}^2/\text{V.s}$	2717 $\text{cm}^2/\text{V.s}$
0.15 V	3400 $\text{cm}^2/\text{V.s}$	3056 $\text{cm}^2/\text{V.s}$

Tablo 4.1 incelendiğinde yine artan V_{ds} değerleri için, gerek hol gerekse elektron mobilitelerinin arttığı düşünülebilmektedir. Lakin bu artışın asıl nedeni, daha önceden de bahsedildiği gibi ısınmanın sonucu olarak mobiliteleri olumsuz etkileyen kirliliklerin grafen üzerinden uzaklaştırılması olarak düşünülmektedir.

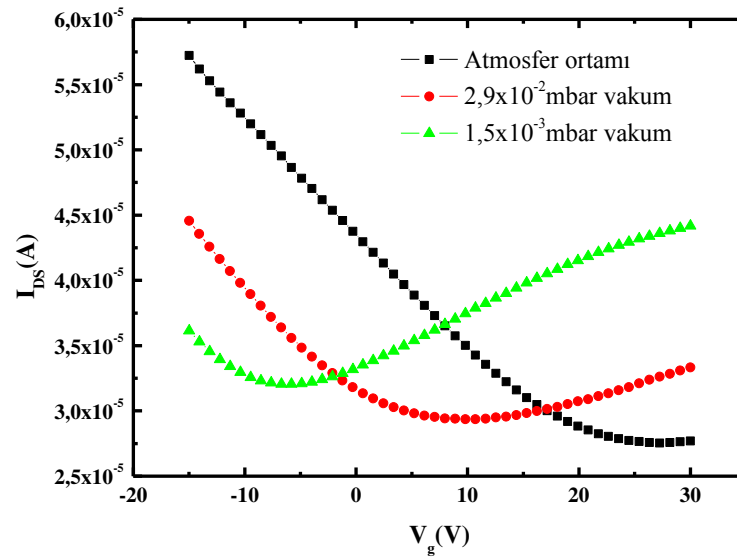


Şekil 4.15 Grafen numunenin atmosfer ortamındaki farklı V_{ds} değerleri için ρ - V_g grafiği.

Şekil 4.13 de optik görüntüsü olan grafen numunenin aynı V_{ds} değerleri için ρ - V_g grafiği Şekil 4.15 de çizilmiştir. Şekil 4.15 de, uygulanan kapı gerilimine karşılık öz direncin değiştiği görülmektedir. Uygulanan kapı gerilimi giderek artırıldığında öz direnç giderek azaldığı görülmektedir (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir).



Şekil 4.16 Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.



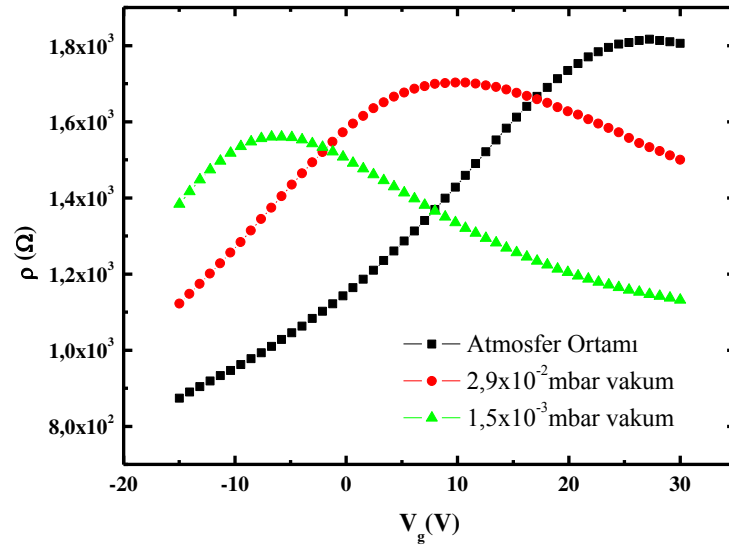
Şekil 4.17 Grafen numunenin atmosfer ve vakum ortamı altındaki I_{ds} - V_g grafiği.

Yukarıda Şekil 4.16 da optik görüntüsü olan HOPG den üretilmiş grafen numune üzerinden atmosfer ve vakum ortamında ölçümler alınmıştır. İlk I_{ds} - V_g ölçümü, $V_{ds} = 0,05$ V için atmosfer ortamında alınmıştır. İkinci ölçüm ise, $V_{ds} = 0.05$ V için 2.9×10^{-2} mbar vakum altında gerçekleştirilmiştir. En son ölçüm ise yine $V_{ds} = 0.05$ V için 1.5×10^{-3} mbar vakum altında yapılmıştır. Şekil 4.17 de bu üç ölçüm için I_{ds} - V_g grafiği çizilmiştir. Grafik incelendiğinde, grafen numune atmosfer ortamında iken Dirac noktasının pozitif bölgede ($V_g \approx 30$ V) olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra grafen numune 2.9×10^{-2} mbar vakum altında iken, Dirac noktasının biraz daha sola ($V_g \approx 10$ V) doğru kaydığı tespit edilmiştir. Vakum değeri biraz daha iyileştirilip 1.5×10^{-3} mbar değerine ulaştırıldığında Dirac noktasının negatif bölgeye ($V_g \approx -10$ V) doğru kaydığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.2: Grafen numunenin farklı vakum değerleri altında hol ve elektron mobilitesi.

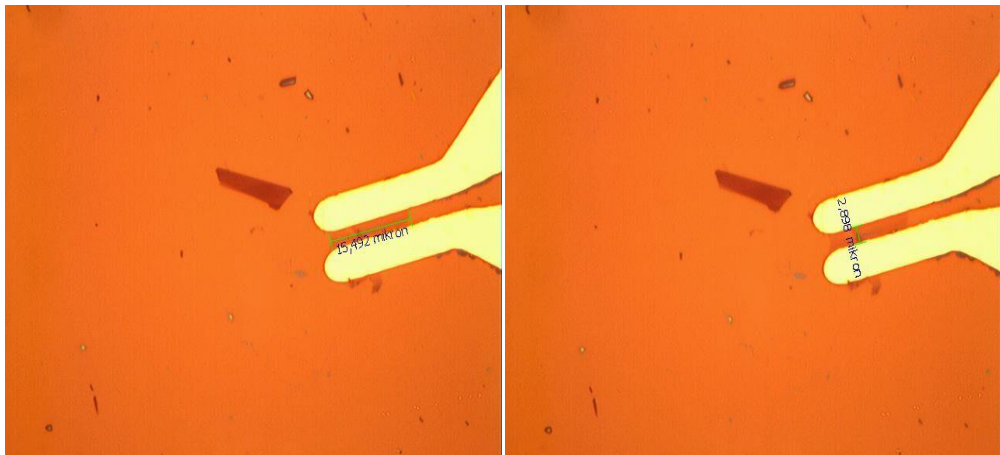
Vakum Değeri	Hol Mobilitesi	Elektron Mobilitesi
Atmosfer Ortamı	1427 cm ² /V.s	-
2.9×10^{-2} mbar	1398 cm ² /V.s	378 cm ² /V.s
1.5×10^{-3} mbar	430 cm ² /V.s	678 cm ² /V.s

Şekil 4.17 deki I_{ds} - V_g grafiğinin eğiminden yararlanarak mobilite hesabı hem atmosfer hemde vakum ortamları için ayrı ayrı yapılmıştır. Atmosfer ortamında hol mobilitesi 1427 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Elektron mobilitesi ise, Şekil 4.17 de I_{ds} - V_g grafiğinden pozitif bölgede eğim alınamadığı için hesaplanamamıştır. 2.9×10^{-2} mbar vakum altında hol mobilitesi 1398 cm²/V.s olarak hesaplanırken, elektron mobilitesi 378 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Vakum değeri 1.5×10^{-3} mbar değerine ulaştığında ise, hol mobilitesi 430 cm²/V.s bulunurken, elektron mobilitesi 976 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır.

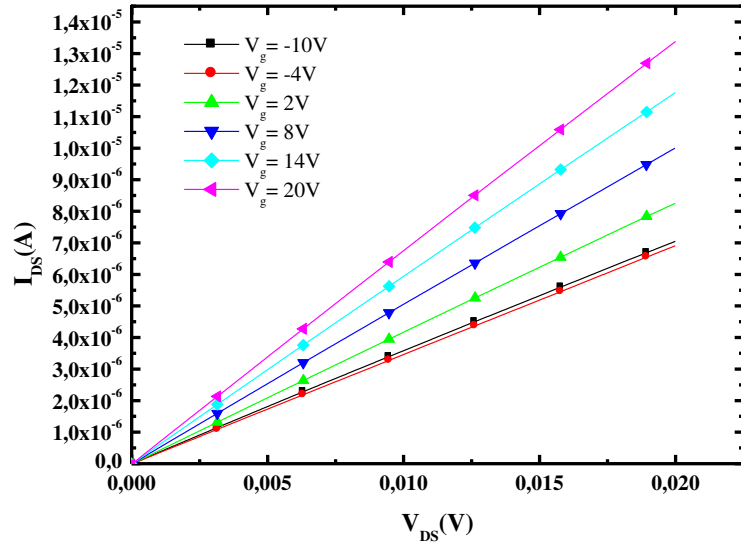


Şekil 4.18 Grafen numunenin atmosfer ve vakum ortamı altındaki ρ - V_g grafiği.

Şekil 4.18 de ise Şekil 4.16 da optik görüntüsü olan grafen numunenin $V_{ds} = 0.05$ V değeri için Şekil 4.17 deki aynı atmosfer ve vakum değerlerinde ρ - V_g grafiği çizilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, öz direncin uygulanan kapı gerilimi ile değiştiği görülmektedir. Uygulanan kapı gerilimi giderek artırıldığında öz direnç giderek azaldığı görülmektedir (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir).

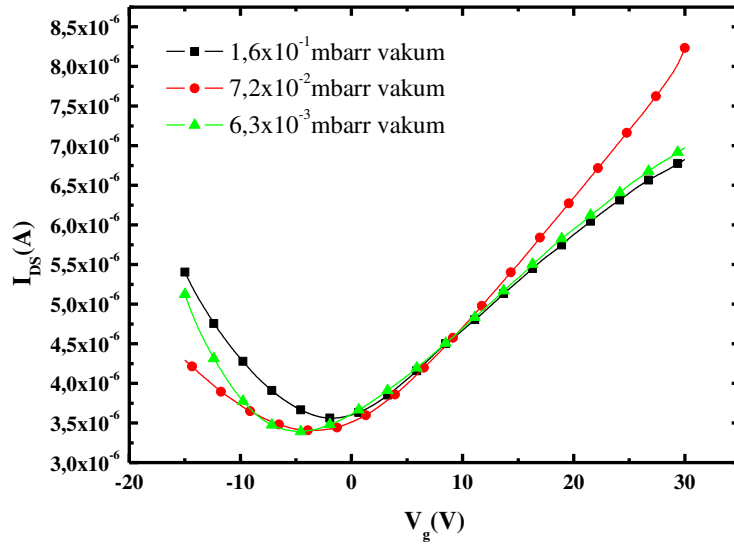


Şekil 4.19 Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.



Şekil 4.20 Grafen numunenin 2.8×10^{-2} mbar vakum altındaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

Yukarıda Şekil 4.19 da optik görüntüleri olan grafen numunenin 2.8×10^{-2} mbar vakum altında $V_g = -10$ V - 25 V arasında ve $V_{ds} = 0.02$ V değeri için I_{ds} - V_{ds} ölçümü alınmıştır. Şekil 4.20 de I_{ds} - V_{ds} grafiği çizilmiştir.



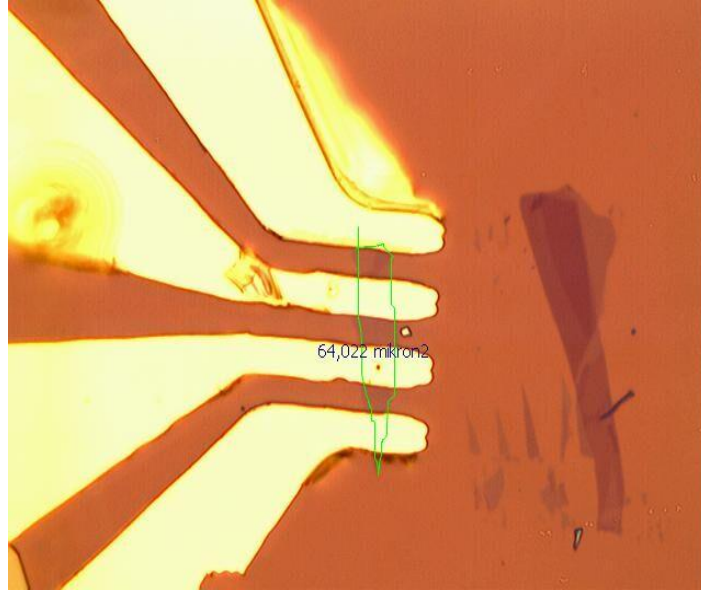
Şekil 4.21 Grafen numunenin farklı vakum değerleri altındaki I_{ds} - V_g grafiği.

Şekil 4.19 da optik görüntüleri olan grafen numunenin, vakum değerleri sırayla 1.6×10^{-1} mbar, 7.2×10^{-2} mbar ve 6.3×10^{-3} mbar için Şekil 4.21 de $I_{ds}-V_g$ grafiği çizilmiştir. Grafik incelendiğinde vakum değeri iyileştikçe Dirac noktasının negatif bölgeye (sıfırın soluna) doğru kaydığı gözlenmiştir. Bu kaymanın nedeninin ise daha önce de belirtildiği gibi grafen numune üzerinde tutunan istenmeyen kirliliklerinin vakum altında grafen üzerinden uzaklaşması ve sonucunda katkılama tipinin değişmesi olarak düşünülmüştür.

Tablo 4.3: Grafen numunenin farklı vakum değerleri altında hol ve elektron mobiliteleri.

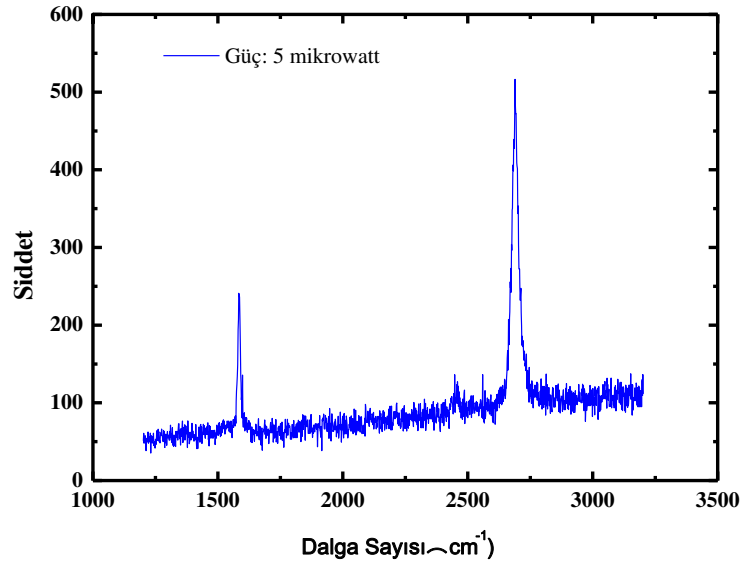
Vakum Değeri	Hol Mobilitesi	Elektron Mobilitesi
1.6×10^{-1} mbar	$864 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$673 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
7.2×10^{-2} mbar	$430 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$891 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
6.3×10^{-3} mbar	$1320 \text{ cm}^2/\text{V.s}$	$540 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

Şekil 4.21 deki $I_{ds}-V_g$ grafiğinden yararlanılarak farklı vakum değerleri için hem elektron hemde hol mobiliteleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 4.3 de farklı vakum değerlerine bağlı elektron ve hol mobiliteleri verilmiştir. Vakum değeri 1.6×10^{-1} mbar için hol mobilitesi $864 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ bulunurken, elektron mobilitesi $673 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ bulunmuştur. Vakum 7.2×10^{-2} mbar değerine ulaştığında ise hol mobilitesi $430 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanırken, elektron mobilitesi $891 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Daha da iyileşen vakum 6.3×10^{-3} mbar değerine ulaştığında ise hol mobilitesi $1320 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulunurken, elektron mobilitesi $540 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.22 Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.

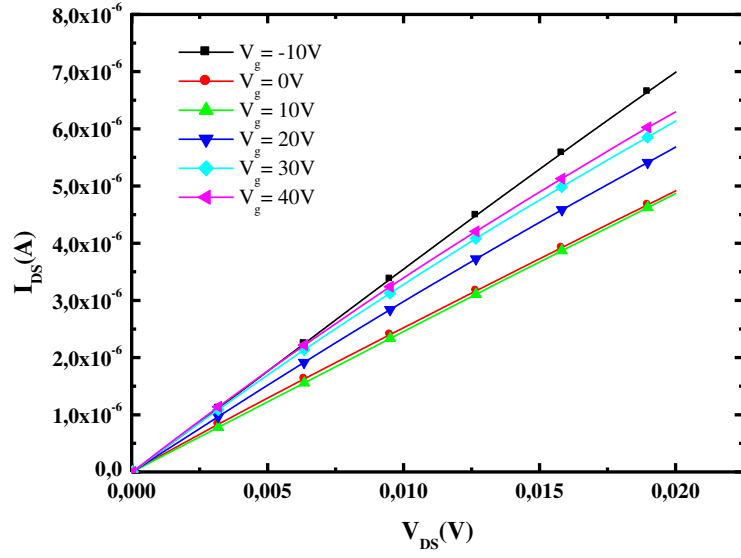
Yukarıda Şekil 4.22 de optik görüntüsü bulunan kish grafitten üretilen grafen numunenin vakum ortamında ve nem altında elektriksel ölçümleri alınmıştır.



Şekil 4.23 Neme bağlı ölçüm alınan grafen numunenin Raman Spektrumu.

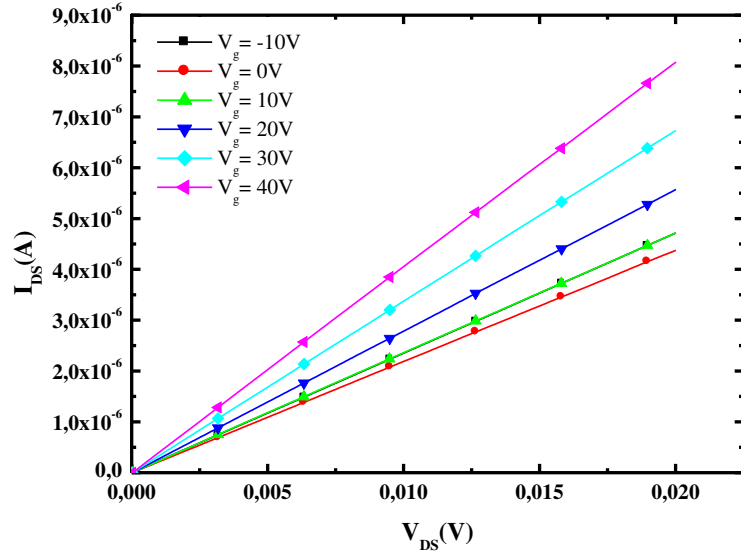
Şekil 4.22 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin 514 nm dalga boyuna sahip lazer kullanılarak Raman spektroskopisi çekilmiş ve Şekil 4.23 de Raman spektrumu

izilmiştir. Raman spektrumu incelendiğinde 2D bandının G bandında daha büyük olduğu ve 2D bandını çok keskin pik verdiği grlmştir. Ayrıca atomik kusurlardan kaynaklanan D bandı görülmemiştir. Bu bulgular nem ve vakum ortamında elektriksel ölçümleri alınan grafen numunenin tek tabaka olduğunu kanıtlamaktadır [16].



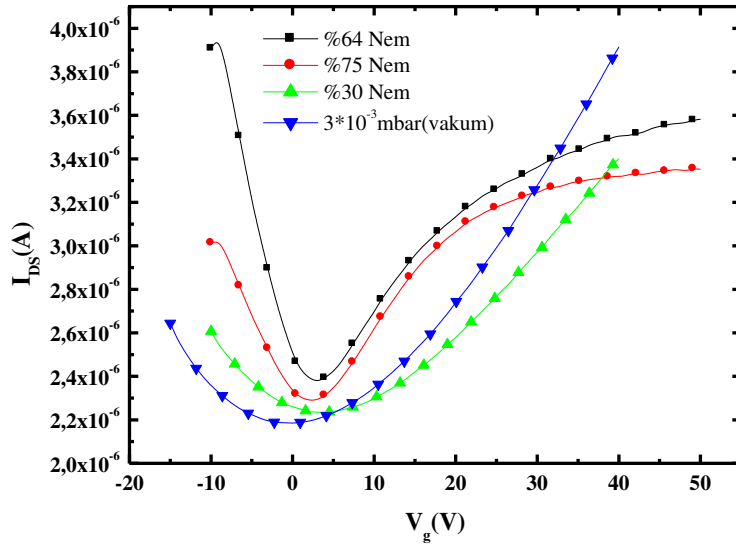
şekil 4.24 Grafen numunenin % 75 nem altındaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

şekil 4.22 de optik grntş bulunan numune üzerinden ilk ölçüm % 75 nem oranı altında I_{ds} - V_{ds} ölçümü alınmıştır. % 75 nem altında I_{ds} - V_{ds} grafiği şekil 4.24 de çizilmiştir.



Şekil 4.25 Grafen numunenin 3×10^{-3} mbar vakum altındaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

Şekil 4.22 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin 3.6×10^{-3} mbar vakum altında I_{ds} - V_{ds} ölçümü alınmıştır. Şekil 4.25 de $V_{ds} = 0.02$ V için 3.6×10^{-3} mbar vakum altında I_{ds} - V_{ds} grafiği çizilmiştir.



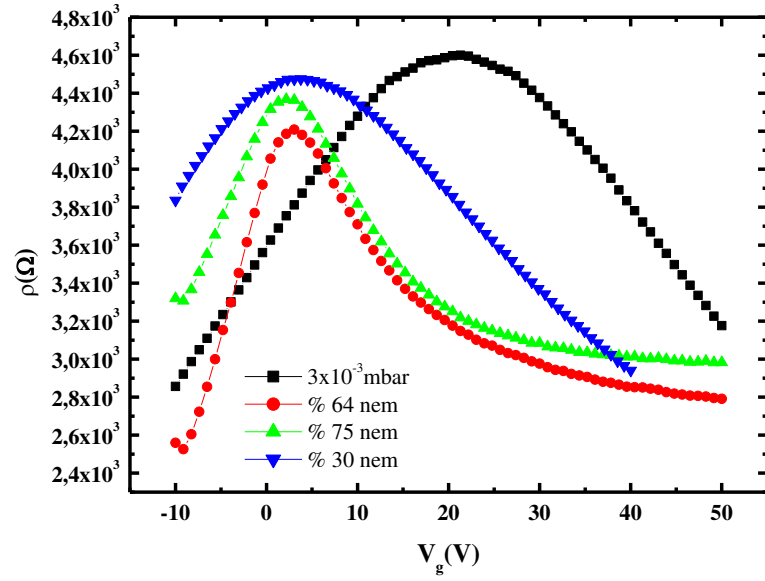
Şekil 4.26 Grafen numunenin nem ve vakum altındaki I_{ds} - V_g grafiği.

Şekil 4.22 de optik görüntüsü bulunan grafen numune üzerinden nem oranı sırasıyla % 30, % 64 ve % 75 değerleri için ve 3.6×10^{-3} mbar vakum altında $V_{ds} = 0.01$ V için I_{ds} - V_g ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.26 da bu ölçümlerin grafiği çizilmiştir. İlk ölçüm nem oranı % 30 için yapılmış ve Dirac noktası $V_g \approx 8$ V civarlarında tespit edilmiştir. Sonraki ölçüm nem oranı % 64 için yapılmıştır. Nem oranı arttığında Dirac noktası biraz sola kayarak $V_g \approx 4$ V civarlarına gelmiştir. % 75 lik nem oranına ulaşıldığında ise Dirac noktası biraz daha sola kayarak $V_g \approx 3$ V civarlarına gelmiştir. Son olarak grafen numune üzerindeki nem etkisini kaldırmak için, numunun 3.6×10^{-3} mbar vakum altında ölçümü yapılmıştır. Vakum altında Dirac noktası çok daha bariz bir şekilde sola kayarak $V_g \approx 0$ V civarlarına gelmiştir.

Tablo 4.4: Grafen numunenin farklı nem değerler altında elektron ve hol mobilitesi.

Nem Oranı	Hol Mobilitesi	Elektron Mobilitesi
%75 Nem	637 cm ² /V.s	744 cm ² /V.s
%64 Nem	1466 cm ² /V.s	872 cm ² /V.s
%30 Nem	326 cm ² /V.s	320 cm ² /V.s
3×10^{-2} mbar vakum	374 cm ² /V.s	647 cm ² /V.s

Şekil 4.26 daki I_{ds} - V_g grafiğinden yararlanılarak farklı nem oranları için hol ve elektron mobiliteleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 4.4 de nem oranı sırasıyla % 30, % 64 ve % 75 için ve 3.6×10^{-3} mbar vakum değeri için hol ve elektron mobiliteleri verilmiştir. Nem oranı % 75 iken hol mobilitesi 637 cm²/V.s olarak hesaplanırken, elektron mobilitesi 744 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Nem oranı % 64 için ise, hol mobilitesi en yüksek değerine ulaşmış olup 1466 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Aynı nem oranı için elektron mobilitesi yine en yüksek değere ulaşmış olup 872 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Nem oranı % 30 için, hol mobilitesi en düşük değerde olup 326 cm²/V.s olarak hesaplanırken, elektron mobilitesi ise en düşük değerde olup 320 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır. Vakum değeri 3.6×10^{-3} mbar iken, hol mobilitesi 374 cm²/V.s olarak hesaplanırken, elektron mobilitesi ise 647 cm²/V.s olarak hesaplanmıştır.



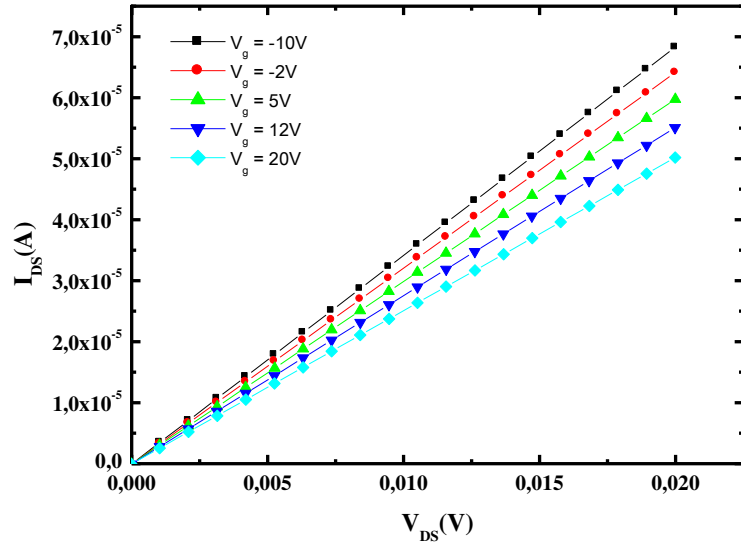
Şekil 4.27 Grafen numunenin nem ve vakum altındaki ρ - V_g grafiği.

Şekil 4.22 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin aynı nem ve vakum değerleri için Şekil 4.27 de ρ - V_g grafiği çizilmiştir. Grafik incelendiğinde, uygulanan kapı gerilimine karşılık öz direncin değiştiği görülmektedir. Uygulanan kapı gerilimi giderek artırıldığında öz direnç giderek azaldığı görülmektedir (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir).



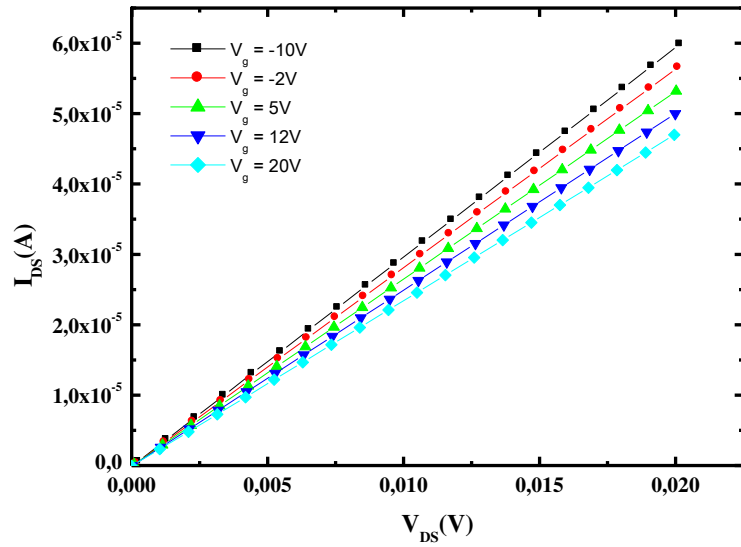
Şekil 4.28 Grafen numunenin optik mikroskop altındaki görüntüsü.

Yukarıda Şekil 4.28 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin farklı sıcaklık değerleri için I_{ds} - V_{ds} ve I_{ds} - V_g ölçümü alınmıştır.



Şekil 4.29 Grafen numunenin – 175 ⁰C sıcaklıktaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

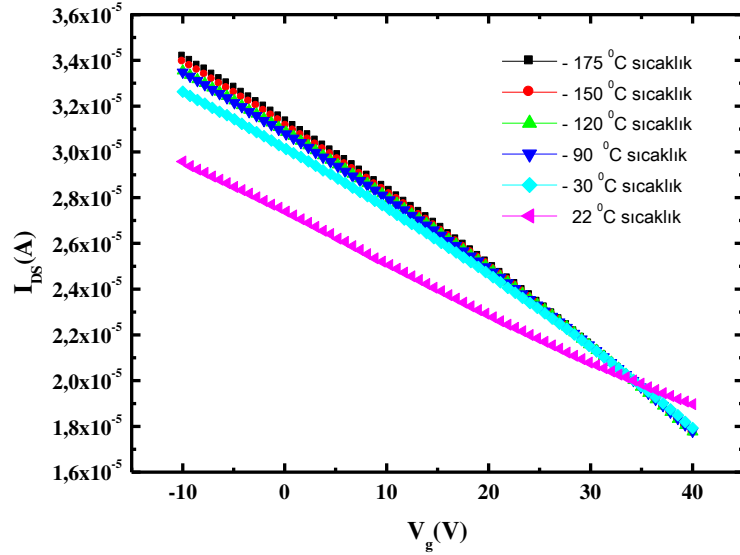
Şekil 4.28 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin sıcaklığa bağlı ölçümleri sıvı azot kullanılarak krostatda alınmıştır. Öncelikle grafen numunenin -175 ⁰C sıcaklık değeri için I_{ds} - V_{ds} ölçümü alınmıştır. Şekil 4.29 da I_{ds} - V_{ds} grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.30 Grafen numunenin 22 ⁰C sıcaklıktaki I_{ds} - V_{ds} grafiği.

Şekil 4.28 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin sıcaklığa bağlı en son

ölçümü, 22 °C sıcaklıkta I_{ds} - V_{ds} ölçümü alınarak yapılmıştır. Şekil 4.30 da bu sıcaklık değeri için I_{ds} - V_{ds} grafiği çizilmiştir.



Şekil 4.31 Grafen numunenin farklı sıcaklık değerlerinde I_{ds} - V_g grafiği.

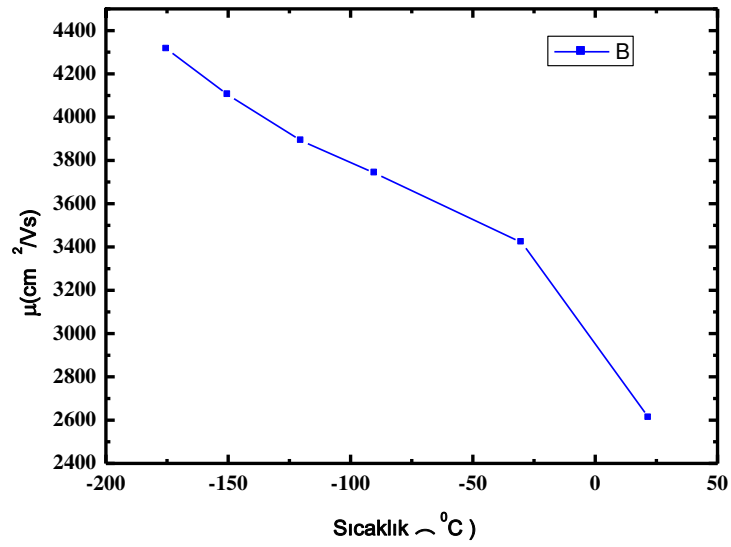
Şekil 4.28 de optik görüntüsü bulunan grafen numunenin -175 °C sıcaklıktan başlayarak en son 22 °C sıcaklıkta olmak üzere değişik sıcaklıklarda I_{ds} - V_g ölçümü alınmıştır. Şekil 4.31 de grafen numunenin bu sıcaklıklara bağlı I_{ds} - V_g grafiği çizilmiştir. Grafik incelendiğinde, artan sıcaklıkla birlikte I_{ds} - V_g grafiğinin eğiminin giderek azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca I_{ds} - V_g ölçümleri $V_g = -10 \text{ V} - 40 \text{ V}$ değerleri arasında alınmış olup bu değerler arasında Dirac noktası gözlenememiştir

Tablo 4.5: Grafen numunenin farklı sıcaklık değerleri için mobilite değerleri.

Sıcaklık (°C)	-175	-150	-120	-90	-30	22
Hol Mobilitesi ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	4314	4102	3890	3740	3420	2610

Yukarıdaki Şekil 4.31 deki I_{ds} - V_g grafiğinden faydalanılarak farklı sıcaklık değerleri için hol mobiliteleri hesaplanmıştır. Elektron mobiliteleri Şekil 4.31 deki I_{ds} - V_g grafiğinde Dirac nokta görülemediği için hesaplanamamıştır. Tablo 4.5 de sıcaklık değişimine karşı hol mobilitesindeki değişim verilmiştir. -175 °C sıcaklık için hol

mobilitesi $4314 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık -150°C olduğunda ise hol mobilitesi $4102 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık biraz daha artırılıp -120°C olduğunda ise hol mobilitesi $3890 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. -90°C sıcaklığa gelindiğinde ise hol mobilitesi $3740 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık -30°C olduğunda ise, hol mobilitesi $3420 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. En son ölçüm 22°C sıcaklık için alınmış olup, hol mobilitesi $2610 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.32 Grafen numunenin sıcaklık mobilité grafiğı.

Son olarak mobilitenin sıcaklığa bağılı değışim grafiğı Şekil 4.32 de verilmiştir. Şekil 4.32 deki grafik incelendiğinde, sıcaklık değıerinin giderek artmasıyla mobilité değıerinin giderek azaldığı net bir şekilde görölmektedir.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, mekanik ayrılma yöntemi ile üretilen grafen numunelerin atmosfer ortamında, vakum ortamında, farklı nem ve sıcaklık değerleri altında elektriksel karakteristiği incelenmiştir. Deneylerdeki grafen numuneler, HOPG ve Kish grafitten mekanik ayrılma yöntemi ile üretilmişlerdir. Grafen üretiminde mekanik ayrılma yönteminin tercih edilmesinin nedeni, kolay ve ucuz bir yöntem olması yanında kusursuz grafen üretilebilen bir yöntem olmasındandır. Bu yöntemde elde edilen grafenin elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için onu bir yalıtkan yüzey üzerine aktarılması gerekmektedir. Bu çalışmada yalıtkan yüzey olarak 285 nm silisyumdioksit kaplı silisyum-silisyumdioksit (Si/SiO_2) alttaşlar kullanılmıştır. Bu aktarma esnasında grafen numune ortamla istemsiz olarak etkileşmekte ve grafen numune üzerinde elektriksel özelliklerini olumsuz etkileyecek kirlilikler oluşmaktadır. Ayrıca bu yöntemde yapışkan bant kullanılması da grafen numune için bir kirlilik nedenidir. Grafen üretimi esnasında banttıan geriye kalan kirlilikler su moleküllerinin dipolüne ek olarak bir elektrik dipol oluşturmakta ve bu istenmeyen bir elektrik alan üretmektedir. Bunun yanında mekanik ayrılma yöntemi ile üretilen grafen numuneler laboratuvar araştırmalarına uygunken endüstriyel uygulamalardaki seri üretim gereksinimi için uygun görülmemektedir.

Bu çalışmada elektriksel ölçümleri alınan grafen numunelerin tek tabaka grafen oldukları ölçülen Raman Spektrumaları ile doğrulanmıştır. Yine atmosfer ve çeşitli nem değerlerinde elektriksel ölçümleri gerçekleştirilen numunelerin tek atom tabakalı oldukları Raman Spektrumları ile tespit edilmiştir. Her iki numunenin de Raman Spektrumları incelendiğinde 2D bandının G bandından daha büyük olduğu ve 2D bandının keskin bir pik verdiği açık bir şekilde görülmüştür. Ayrıca Raman Spektrumunda D bandının görülmemesi bu çalışmalarda üretilen grafen numunelerin atomik kusurlar içermediğini kanıtlamıştır. Çünkü Raman Spektrumundaki D bandı, atomik dizinin içindeki düzensizliklerin varlığından veya grafenin kenar kusurlarından, içindeki dalgalanmalardan, yük gölcüklerinden dolayı görülmektedir [16]. Çalışmamızda, ilk ölçümler Şekil 4.7 de optik görüntüsü bulunan grafen

numune için, $V_{ds} = 0.1$ V ve $V_{ds} = 0.3$ V değerlerinde atmosfer ortamında alınmış ve Şekil 4.9 ve Şekil 4.11 de I_{ds} - V_{ds} grafikleri çizilmiştir. $V_{ds} = 0.1$ V için taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği Şekil 4.10 da ve $V_{ds} = 0.3$ V için taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı mobilite grafiği Şekil 4.12 de verilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.12 birlikte incelendiğinde gerek hol, gerekse elektron mobilitelerinin Şekil 4.12 de daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, V_{ds} değeri ile alakalı değildir. Sadece grafen numune üzerinden daha fazla akım geçmesi ve dolayısıyla grafenin daha fazla ısınmasıyla alakalıdır. Yani V_{ds} değeri arttığı için mobilitenin arttığı kanısı doğru değildir. Mobilite artışının temel nedeni, grafen numunenin ısınmasıdır. Isınmanın etkisiyle grafen yüzeyine tutunan ve mobiliteyi olumsuz etkileyen kirlilikler grafen numune üzerinden uzaklaştırılmış olmaktadır. Ayrıca Şekil 4.10 ve Şekil 4.12 deki taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak mobilite grafikleri incelendiğinde, gerek hol mobilitelerinin gerekse elektron mobilitelerinin artan taşıyıcı konsantrasyonuyla giderek azaldığı görülmüştür. Azalmanın nedeni, artan taşıyıcı konsantrasyonu durumunda taşıyıcıların birbiriyle çarpışmaları (etkileşimleri) artırmıştır. Çarpışmaların artması doğal olarak mobiliteyi azaltmıştır [4].

Bir sonraki ölçüm, Şekil 4.13 de optik görüntüsü olan Kish grafitten elde edilmiş grafen numune üzerinden atmosfer ortamında alınmıştır. Grafen numunenin farklı V_{ds} değerleri için I_{ds} - V_g ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.14 deki I_{ds} - V_g grafiği incelendiğinde, $V_{ds} = 0.05$ V için Dirac noktasının $V_g \approx 17$ V civarında olduğu görülmektedir. $V_{ds} = 0.15$ V değerine artırıldığında ise Dirac noktasının $V_g \approx 25$ V civarında olduğu görülmektedir. Yani Dirac noktası sağ tarafa doğru kaymaktadır. Dirac noktasının değişmesinin nedeni artan V_{ds} değeri değil, grafen numunenin daha fazla ısınmasıdır. Tablo 4.1 incelendiğinde, giderek artan V_{ds} değerleri için hem elektron hemde hol mobilitelerinin giderek arttığı düşünülebilmektedir. Fakat bu doğru bir yaklaşım değildir. Isınmanın sayesinde, grafen yüzeyine tutulan kirlilikler yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Mobiliteyi olumsuz etkileyen kirliliklerin ortadan kalkması hem elektron hemde hol mobilitelerinin artmasına neden olmuştur. Ayrıca Şekil 4.15 deki ρ - V_g grafiği incelendiğinde, Dirac noktası ve Dirac noktasındaki kaymalar net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.15 deki grafikte uygulanan kapı gerilimine karşılık öz direncin değiştiği görülmektedir. Uygulanan kapı gerilimi

giderek artırıldığında öz direnç giderek azaldığı görülmektedir (kapı gerilimi negatif veya pozitif olabilir). Burada öz direnç kendi pik değerine ulaştığında, taşıyıcı konsantrasyonu ile doğrudan alakalı olan Hall katsayısının işareti keskin bir ters dönüşüm gösterir. Bu ters dönüşümün nedeni taşıyıcı tipinin değişmesidir. Yani ilk durumda yük taşıyıcısı hollerken, daha sonra yük taşıyıcısı elektronlar olmuştur. Buradan grafenin her iki yük taşıyıcısını da içeren bir madde olduğu anlaşılmaktadır. Bu yük taşıyıcıları dışarıdan uygulanan kapı gerilimiyle kontrol edilebilmektedir. Bu davranış, grafenin ambipolar alan etkisine sahip olduğunu doğrulamaktadır [9].

Daha sonraki ölçüm, HOPG den üretilmiş grafen numune üzerinden atmosfer ve vakum ortamında alınmıştır. Grafen numunenin atmosfer ve farklı iki vakum değeri için $I_{ds}-V_g$ ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.17 deki $I_{ds}-V_g$ grafiği incelendiğinde, atmosfer ortamında Dirac noktasını pozitif bölgede olduğu gözlenmiştir. Daha sonra grafen numune vakum altına alınmış ve vakum değeri 2.9×10^{-2} mbar değerine ulaştığında Dirac noktasının sıfır değerine doğru kaydığı gözlenmiştir. Vakum daha da iyileşip 1.5×10^{-3} mbar değerine ulaştığında ise Dirac noktası negatif bölgeye doğru kaymıştır. Dirac noktasındaki bu kaymaların temel nedeni istenmeyen moleküllerin grafen yüzeyine tutunmuş olmasıdır. Tutunan moleküller grafen yüzey üzerinde kümeler oluşturmakta ve ayrıca grafeni n- tipi veya p- tipi katkılamaaktadırlar. Peki katkılama nasıl oluşur?

Katkılama faktörlerinden birisi elektriksel kontak metalidir [94]. Bunun temel nedeni ise, grafen ile metal arasındaki iş fonksiyonu farkıdır. Metalin iş fonksiyonu, grafenin iş fonksiyonundan küçük ise katkılama n- tipi şeklinde olmaktadır. Metalin iş fonksiyonu, grafenin iş fonksiyonundan büyük ise katkılama p- tipi şeklinde olmaktadır. Katkılama tipine ve katkılanma miktarına bağlı olarak Dirac noktasında kaymalar olmaktadır. Dirac noktasındaki kaymalar n- tipi katkılamalarda kapı geriliminin pozitif bölgesine (yapılan elektriksel bağlantıda kapı-kaynak geriliminde kapı kısmı daha pozitif olmak kaydıyla), p- tipi katkılamalarda ise negatif bölgesine olmaktadır. Ayrıca katkılanma miktarı değiştiğinde Dirac noktasındaki kayma miktarıda değişmektedir. Bu bilgiler ışığında Şekil 4.17 deki $I_{ds}-V_g$ grafiği tekrar incelendiğinde, grafen numune atmosfer ortamındayken üzerine tutunan moleküller nedeniyle n- tipi şeklinde katkılanmış ve Dirac noktasının pozitif bölgede ($V_g \approx 30$

V) olduğu tespit edilmiştir. Grafen numune vakum altına alındığında, grafen üzerine tutunan ve katkılama yapmaya sebep olan bazı moleküller yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Fakat yüzeydeki istenmeyen moleküllerin, yüzeye tutunma enerjileri birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle yüzeyden uzaklaştırılmaları da farklı vakum değerlerinde olması beklenmektedir. Vakum 2.9×10^{-2} mbar değerindeyken yüzeyde n- tipi katkılama yapmayı sağlayan moleküller yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Bu nedenle Dirac noktasının biraz daha sola ($V_g \approx 10$ V) doğru kaydığı tespit edilmiştir. Vakum değeri daha da iyileşip 1.5×10^{-3} mbar değerine ulaştırıldığında Dirac noktasının negatif bölgeye ($V_g \approx -10$ V) doğru kaydığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla grafen p- tipi katkılanmış olarak görülmektedir. Bunun nedeni ise, vakum altındaki numune yüzeyine tutunan istenmeyen moleküllerden arındırılmış ve geride Dirac noktasının pozisyonunu etkileyecek tek bir etken bırakmıştır. Bu etken, kontak metallere gelen katkılamadır. Kontak metal olarak krom ve altın kullanılmıştır. Kromun iş fonksiyonu 4.5 eV olup grafenle aynıdır. Altının iş fonksiyonu ise 5.1 eV'dur. Altının iş fonksiyonunun grafenin iş fonksiyonundan büyük olması p- tipi bir katkılamaya neden olmuştur. Özellikle Şekil 4.21'de bu durum görülmektedir. Yeterince düşük vakumda yalnızca metal kontakların katkılaması ile Dirac noktası p-tipi katkılamanın olduğu bölgede oluşmaktadır. Mobilitedeki değişimler ise, saçılma ve katkılama mekanizmaları ile alakalıdır. Saçılmalar mobilitayı olumsuz yönde etkilemektedir. Saçılmaların nedeni ise, yüzeye tutunan istenmeyen yük kümeleri, yüzey dalgalanmaları ve akustik fononlardır. Tablo 4.2 incelendiğinde, atmosfer ortamında hol mobilitesi $1427 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplanmıştır. Vakum 2.9×10^{-2} mbar değerinde iken p- tipi katkılama olmuş ve hol konsantrasyonu artmıştır. Bunun sonucunda hol mobilitesi azalmış ve $1398 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak tespit edilmiştir. Vakum 1.5×10^{-3} mbar değerine ulaştığında ise p- tipi katkılama miktarı biraz daha artmış ve bundan dolayı hol konsantrasyonunda biraz daha artmıştır. Hol konsantrasyonunun artması hol mobilitelerini azaltmış ve hol mobilitesi $430 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak tespit edilmiştir. Hol mobilitelerinin azalmasıyla elektron mobilitesi artmıştır.

Bir sonraki ölçümde ise, Şekil 4.19'da optik görüntüsü olan Kish grafitten üretilmiş grafen numune üzerinden sadece farklı vakum değerleri için $I_{ds}-V_g$ ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.21'deki $I_{ds}-V_g$ grafiği incelendiğinde, yine vakumun iyileşmesiyle Dirac noktası sola (negatif bölge) doğru kaydığı görülmektedir. Vakum değeri

1.6×10^{-1} mbar için Dirac noktası sıfır değerine yakınken, vakum 3.6×10^{-3} mbar değerine ulaştığında Dirac noktası biraz daha sola kayarak -5 V değerine ulaşmıştır. Burada da Dirac noktasındaki kaymaların nedeni yine yüzeye tutunan moleküllerin kısmen ortadan kalkması ve metal kontakların iş fonksiyonundan kaynaklanan katkılamadandır. Vakum iyileştikçe Dirac noktasının kapı geriliminin negatif olduğu bölgeye doğru kaydığı görülmüştür. Yani vakum iyileştikçe p – tipi katkılanma görülmüştür. p – tipi katkılanmada hol konsantrasyonunu artırmıştır. Bu durumda hol mobilitesinin, vakumun iyileşmesiyle giderek azalması beklenmektedir. Peki o halde neden Tablo 4.3 de hol mobilitesi, vakum iyileştikçe ilk etapta azalmış sonra yeniden artmıştır ? Numunun yüzeyinde bulunan istenmeyen moleküllerin, mobilitayı etkileyen saçılma mekanizmasının katkılama mekanizmasına göre daha baskın olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Bir sonraki ölçüm, Şekil 4.22 de optik görüntüsü olan Kish grafitin üretilmiş grafen numune üzerinden vakum ve nem ortamlarında alınmıştır. Önce farklı nem oranlarında ve sonrada vakum altında grafen numunenin I_{ds} - V_g ölçümleri alınmıştır. İlk I_{ds} - V_g ölçümü % 30 luk nem oranında daha sonraki I_{ds} - V_g ölçümleri ise % 64 ve % 75 nem oranlarında alınmıştır. En sonunda grafen üzerinden nemin etkisini kaldırmak için 3×10^{-3} mbar vakum altında I_{ds} - V_g ölçümü alınmıştır. Şekil 4.26 daki I_{ds} - V_g grafiği çizilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, % 30 luk nem oranında Dirac noktası pozitif bölgede $V_g \approx 10$ V civarlarında iken, nem oranı % 64 ü bulduğunda Dirac noktası pozitif bölgede $V_g \approx 5$ V civarlarına ve daha sonra da nem oranı % 75 için Dirac noktası $V_g \approx 2$ V civarlarına kaymıştır. Grafen numune 3×10^{-3} mbar vakum altında iken ise Dirac noktası $V_g \approx 0$ V civarlarına kaymıştır. Su buharının grafeni p - tipi katkıladığı bilinmektedir [4]. Nem ortamında Dirac noktasının sola doğru kaymasının nedeninin bu olduğu düşünülmektedir. Nem oranı arttıkça katkılama miktarı artmış ve Dirac noktası daha da sola kaymıştır. Su buharının p – tipi katkıladığını düşünmek nem ortamındaki Dirac noktasının pozisyonunun değişmesi açısından doğru iken, nem ortamındaki mobilite değerleri incelendiğinde büyük bir tezatlık görülmektedir. Çünkü nem oranı % 30 dan % 64 e artırıldığında p – tipi katkılama artmış olmaktadır. Bu durumda hol konsantrasyonunun artmış olması ve dolayısıyla hol mobilitesini düşmüş olması beklenmektedir. Oysa Tablo 4.4 incelendiğinde bunun böyle olmadığı görülmektedir. Nem oranı % 64 için hol

mobilitesi artmış daha sonra nem oranı % 75 için hol mobilitesi azalmıştır. Ayrıca 3×10^{-3} mbar vakum altında hol mobilitesi artması beklenirken, hem elektron hemde hol mobilitesi azalmıştır. Mobilitedeki bu değişmelerin nedeni ise arayüzey dipol tabakanın oluşması olarak düşünülmektedir [93]. Bilindiği üzere su molekülleri yüksek dipol momentte sahiplerdir. Grafen numune nem ortamında iken, su molekülleri kontak metallere grafen arasına girerek bir arayüzey dipol tabaka oluşturmaktadırlar. Arayüzeye tutunan her su molekülü, dipol momente ve elektrik alana sahiptir [28]. Su moleküllerinden kaynaklanan alan, kapı voltajı gibi bizim tarafımızdan dıştan uygulanan alanları etkileyebilmektedir. Bu durumda elektron ve hol mobilitelerinde beklenenin dışında bir değişim görülebilmektedir. Ayrıca su molekülleri ile grafen arasında kimyasal etkileşimlerin olduğu, bu etkileşimlerin mobilitenin değişmesine neden olan arayüzey dipol tabakasına ek olarak bir etken oluşturduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.28 de optik görüntüsü olan Kish grafitten üretilmiş grafen numune üzerinden farklı sıcaklık değerleri için alınmıştır. -175°C sıcaklıktan başlayarak 22°C sıcaklığa kadar farklı sıcaklıklarda grafen numunenin $I_{ds}-V_g$ ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümde asıl amaç sıcaklık değişiminin mobilité üzerine etkisini gözlemleyebilmektir. Deneysel sonuçlar en yüksek mobilitenin en düşük sıcaklık değeri olan -175°C sıcaklıkta hesaplandığını göstermiştir. En düşük mobilitenin ise en yüksek sıcaklık değeri olan 22°C sıcaklıkta olduğu gözlenmiştir. Yani sıcaklık değerinin giderek artmasıyla mobilité değeri giderek azalırken, sıcaklığın azalmasıyla da mobilitenin değeri giderek artmıştır. Sıcaklığa bağlı elektriksel ölçümlerde elektron mobilitesine ilişkin veri alınamamıştır çünkü bu numunenin Dirac noktasının gözlenmesi 50 V luk kapı geriliminin üzerinde bir gerilime ihtiyaç vardır. Yüksek kapı gerilimleri ise silisyumdioksitin kırılmasına yol açmakta ve böylece üretilen alan etkili transistör yapısında kapı ile kaynak arası bölge kısa devre olmaktadır.

Mobilitenin sıcaklıkla değişimi Drude modeli çerçevesinde değerlendirilmiştir. Sıcaklık değişimi, metaller ve yarımetallerde yük taşıyıcılarının sayısını değiştirmezken, fononlarla olan etkileşimi değiştirmektedir. Metal ve yarımetallerde, yüksek sıcaklıklarda elektron-fonon etkileşmesi giderek artar. Yüksek sıcaklıklarda artan bu etkileşim, direncinde artmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise

direnç, kirliliklerle sınırlandırılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda elektron-fonon saçılması nispeten görülmez ve direnç, sıcaklığın azalmasıyla giderek azalır. Bu durum düşük sıcaklıklarda mobilitenin artmasına sebep olmaktadır [29].

Sonuç olarak bu çalışmada, grafenin atmosfer, vakum, nem ve sıcaklık ortamlarında elektriksel karakteristiği yukarıda bahsedilen deneyler sayesinde incelenmiştir. Yapılan deneylerden alınan ölçümler sayesinde, grafenin bu ortamlar altında iken mobilite değerleri hesaplanmıştır. Atmosfer ve vakum değerleri için mobilite değerleri kıyaslanmıştır. Ayrıca farklı sıcaklık değerleri için mobilite değerleri ve farklı nem oranları için mobilite değerleri kıyaslanmıştır. Dirac noktasındaki kaymaların nedenleri hakkında ve mobilitedeki değişimler hakkında incelemeler yapılmıştır. Ayrıca grafenin üstün elektriksel özelliği olan ambipolar alan etkisi yapılan deneylerde net bir şekilde görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Emerging Research Devices," (The International Technology Roadmap for Semiconductors), 2009.
- [2] Moore, G., Electronics **38**, 1965.
- [3] Streetman, B., *Solid State Electronic Devices* (Prentice-Hall International, Inc., New Jersey), 1995.
- [4] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., " Electric field effect in atomically thin carbon flims", Science **306**, 666-669, 2004.
- [5] Slonczewski, J. C., Weiss, P.R., Band structure of graphite. Phys Rev., **109**: 272, 1958.
- [6] Ubbelohde, A. R., Lewis, L. A., Graphite and its crystal compounds. London: Oxford University Press., 1960.
- [7] Peierls, R. E., Ann. I. H. Poincare, **177**, 1935.
- [8] Landau, L. D., Phys. Z. Sowjetunion11, **26**, 1937.
- [9] Geim, A. K., Novoselov, K. S., The rise of graphene. Nature materials., Vol: **6**, 2007.
- [10] Geim, A. K., Novoselov, K. S., Nature Mat., **6**, 183, 2007.
- [11] Land, T. A., Michely, T., Behm, R. J., Hemminger, J. C., Comsa, G., STM investigation of single layer graphite structures produced on Pt (111) by hydrocarbon decomposition. Surf Sci., 264:261, 1992.
- [12] Nagashima, A., Nuka, K., Itoh, H., Ichinokawa, T., Oshima, C., Otani, S., Electronic states of monolayer graphite formed onTiC (111) surface. Surf Sci., **291**,93, 1993.
- [13] Singh, V., Joung, D., Graphene based materials: Past, present and future. Progress in Materials Science., **56**, 1178-1271, 2011.
- [14] Zheng, Y., Ando, T., Hall conductivity of a two-dimensional graphite system. Phys. Rev. B., **65**, 245420, 2002.
- [15] Obradovic, B., & Kotlyar, R., Analysis of graphene nanoribbons as a channel material. Applied Physics Letter.,**88**, 142102, 2006.
- [16] Graf, D., & Molitor, F., Spatially Resolve Raman Spectroscopy of Sing-and Few-Layer Graphene. Nano Letters., **7**, 238-242, 2006.

- [17] Stankovich, S., Dikin, D., Dommett, G., Graphene-based composite materials. *Nature.*, **442**, 04969, 2006.
- [18] Somani, P.R., Somani, S.P., Umeno, M., Planer nano-graphenes from camphor by CVD. *Chem Phys Lett.*, **430**:56, 2006.
- [19] Staley, N., Wang, H., Litography-free fabrication of graphene devices. *Applied Physics Letters.*, **90**, 143518, 2007.
- [20] De Heer, W., Berger, C., Epitaxial graphene. *Solid State Communacations.*, **143**, 2007.
- [21] Adam, S., Das Sarma, S., Transport in suspended graphene. *Solid State Communication.*, **146**, 356-360, 2008.
- [22] Bolotin, K. I., et. al., *Solid State Comm.*, **146**, 351, 2008.
- [23] Zhu, J., New solution to new problem. *Nature nanotechnology* Vol 3, 2008.
- [24] Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., et al., High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite *Nat.Nanotechnol.*, **3**, 563-568, Sep. 2008.
- [25] Liao, K., Diang, W., Two-step splitting the expandable graphite for few-layer graphene. <http://www.rsc.org/electronicfiles> for details, 2008.
- [26] Teo, G., Wang, H., Visibility study of graphene multilayer structures. *Journal of Applied Physics.*, **103**, 124302, 2008.
- [27] Ouyang, Y., Campbell, P., Guo, J., Analysis of ballistic monolayer and bilayer graphene field-effect transistors. *Applied Physics Letters.*, **92**, 063120, 2008.
- [28] Mosfer, J., Verdeguer, A., The environment of graphene probed by electrostatic force microscopy. *Applied Pyhsics Letters.*, **92**, 123507, 2008.
- [29] Shao, Q., Liu, D., Hight-temperate quenching of electrical resistance in graphene interconnects. *Applied Physics Letters.*, **92**, 202108, 2008.
- [30] Ghosh, S., Calizo, I., Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management application in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters.*, **92**, 151911, 2008.
- [31] Shukla, A., Kumar, R., Graphene made easy: High quality, large-area samples. *Solid State Communication.*, **149**, 2009.
- [32] Dragoman, M., Dragoman, D., Graphene-based quantum electronics. *Progress in Quantum Electronics.*, **33**, 165-214, 2009.

- [33] Dang, X., Lü, L., The adsorption properties of Pb(II) and Cd(II) on functionalized graphene prepared by electrolysis method. *Journal of Hazardous Materials.*, **183**, 923-930, 2010.
- [34] Pearce, R., Lokimov, T., Epitaxially grown graphene based gas sensors for ultra sensitive NO₂ detection. *Sensors and Actuators B.*, **155**, 451, 2011.
- [35] Saner, B., Dinç, F., Yürüm, Y., Utilization of multiple graphene nanosheets in fuel cells: 2. The effect of oxidation process on the characteristics of graphene nanosheets. *Fuel.*, **90**, 2609- 261, 2011.
- [36] Gautom, M., Jayatissa, A., Gas sensing properties of graphene synthesized by chemical vapor deposition. *Materials Science and Engineering C.*, **13**, 4928-4931, 2011.
- [37] Zhang, Y., *Electronic Transport in graphene*, ProQuest Dissertations and Theses, Columbia University, 2006.
- [38] P.R. Wallace. The band theory of graphite. *Physical Review.*, **71**: 622-634, 1947.
- [39] Novoselov, K. S., Jiang, D., et. al., Two-dimensional atomic crystals, *PNAS.*, **102**, (30): 10451-10453, 2005.
- [40] Jung, I., *Optical and Electrical Characterization of Graphene-Based Material*. Degree Doctor of Philosophy. Northwestern University, 2007.
- [41] Zhang, Y., et. al., Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices, *Applied Physics Letter.*, **86**, 073104, 2005.
- [42] Zhang, Y., et. al., Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *Nature.*, **438**, 201-204, 2005.
- [43] Baughman, R.H., Zakhidov, A.A., de Heer, W.A., *Science.*, **297**, 787, 2002.
- [44] Ni, Z. H., Wang, H. M., et. al., Graphene Thickness Determination Using Reflection and Contrast Spectroscopy, *Nano Lett.*, NL071254M, 2007.
- [45] Geim, A. K., et. al., Making Graphene Visible, *Applied Physics Letters.*, Vol. **91**, pp. 063124-063128, 2007.
- [46] Park, J. S., et. al., G band Raman spectra of single, double and triple layer graphene. *Carbon.*, **47**, 1303, 2009.
- [47] Xia, F., et. al., Photocurrent imaging and efficient photon detection in graphene transistor. *Nano Lett.*, **9**, 1039, 2009.

- [48] Mueller, T., et. al., Role of contacts in graphene transistor: a scanning photocurrent study. *Phys. Rev. B.*, **79**, 245430, 2009.
- [49] Yu, T., Ni, Z., Du, C., Wang, Y., Shen, Z., Raman mapping investigation of graphene on transparent flexible substrate: the strain effect. *J Phys. Chem. C.*, **112**, 12, 12602, 2008.
- [50] Ni, Z. H., Chen, W., Fan, X., Kuo, J. L., Yu, T., Wee, A. T., et. al., Raman Spectroscopy of epitaxial graphene on a SiC substrate. *Phys. Rev. B.*, **77**, 6, 2008.
- [51] Ni, Z. H., Wang, H. M., et. al., Tunable stress and controlled thickness modification in graphene by annealing. *ACS Nano.*, **2**: 1033, 2008.
- [52] Ni, Z. H., Yu, T., Lu, Y. H., Wang, Y. Y., Feng, Y. P., Shen, Z. X., Uniaxial strain on graphene: Raman spectroscopy study and band-gap opening. *ACS Nano.*, **2**, 2301, 2008.
- [53] Mohiuddin, T. M. G., Lombardo, A., Nair, R. R., Bonetti, A., Savini, G., Jalil, R., et. al., Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Gruneisen parameters, and sample orientation. *Phys. Rev. B.*, **79**, 2008.
- [54] Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., McEuen, P. L., Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 215502, 2001.
- [55] Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K., Dai, H., Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature. *Nano Lett.*, **6**, 96, 2005.
- [56] Balandin, A. A., Ghost, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., et. al., Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Lett.*, **8**, 902, 2008.
- [57] Klemens, P. G., Theory of thermal conduction in thin ceramic films. *Int J Thermophys.*, **22**, 265, 2011.
- [58] Ghost, S., Calizo, I., Teweldebrhan, D., et. al., Extremely high thermal conductivity of graphene : prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 151911, 2008.
- [59] Nika, D., Pokatilov, E. P., Askerov A. S., Balandin, A. A., Phonon thermal conduction in graphene role of Unnklapp and edge roughness scattering. *Phys.*

Rev. B., **79**, 155413, 2009.

- [61] Liang, X., Fu, Z., and Chou, S. Y., "Graphene transistors fabricated via transfer printing in device active-areas on large wafer," *Nano Letters.*, **7**, 3840-3844, 2009.
- [62] Song, L., Ci, J. L., Gao, W., and Ajayan, P. M., Transfer Printing of Graphene Using Gold Film, *Acs Nano.*, **3**, 1353-1356, 2009.
- [63] Allen, M. J., Tung, V. C., et. al., Soft Transfer Printing of Chemically Converted Graphene, *Advanced Materials.*, **21**, 2098-2102, 2009.
- [64] Huang, H., Chen, W., Chen, S., Wee, A. T. S., Bottom-up Growth of Epitaxial Graphene on 6H-SiC (0001), *Acs Nano.*, **2**, 2513-2518, 2009.
- [65] Unarunotai, S., Murata, Y., et. al., Transfer of graphene layers grown on SiC wafer to other substrates and their integration into field effect transistor, *Applied Physics Letters.*, **95**, 2009.
- [66] Kocabas, C., Dunham, S., Cao, Q., Cimino, K., Ho, X. N., Kim, H. S., Dawson, D., Payne, J., Stuenkel, M., Zhang, H., Banks, T., Feng, M., Rotkin, S. V., and Rogers, J. A., "High-Frequency Performance of Submicrometer Transistors That Use Aligned Arrays of Single-Walled Carbon Nanotubes," *Nano Letters.*, **9**, 1937-1943, 2009.
- [67] Liu, Z. Y., Sroog, V., and Yang, J. C., Self-assembled crystalline silicon carbide Y junctions by coalescence of nucleated iron catalysts, *Applied Physics Letters.*, **90**, 2010.
- [68] Reina, A., Jia, X. T., Ho, J., et. al., Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor deposition, *Nano Letters.*, **9**, 30-35, 2009.
- [69] Q. K. Yu, J. Lian, S. Siriponglert, H. Li, Y. P. Chen, and S. S. Pei, "Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators," *Applied Physics Letters.*, **93**, 2008.
- [70] Li, X. S., Cai, W. W., Colombo, L., and Ruoff, R. S., Evolution of Graphene Growth on Ni and Cu by Carbon Isotope Labeling, *Nano Letters.*, **9**, 4268-4272, 2009.

- [71] Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J. S., et. al., Roll-to-roll production of 30- inch graphene flims for transparent electrodes, *Nat Nano.*, **42**, 5612-5618, 2009.
- [72] Li X. S., Cai, W. W., An, J. H., Kim, S., Nah, J., Yang, D. X., Piner, R., Velamakanni, A., Jung, I., Tutuc, E., Banerjee, S. K., Colombo, L., and Ruoff, R. S., Large- Area Synthesis of high-Quality and Uniform Graphene Flims on Copper Foils, *Science.*, **324**, 1312-1314, 2009.
- [73] Stankovich, S., Piner, R. D., et. al., Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly, *Journal of Materials Chemistry.*, **16**, 155-158, 2006.
- [74] Stankovich, S., Dikin, A., et.al., Graphene-based composite materials, *Nature.*,**42**, 282-285, 2006.
- [75] He, H., Riedl, T., et. al., Solid-State NMR studies of the structure of graphite oxide, *J. Phys. Chem.*, **100** : 19954-8, 1996.
- [76] Lerf, A., He, H., et. al., ¹³C and ¹H MAS MNR studies of the graphite oxide and its chemically modifiield derivatives. *Solid-State Ionies.*, **101-103** (Pt.2): 857-862, 1997.
- [77] Lerf, A., He, H., et. al., Structure of Graphite Oxide Revisited, *J. Phys. Chem. B.*, **102**, 4477-4482, 1998.
- [78] Hummers, W. S., Offeman, R. E., Preparation of graphitic oxide. *J Am. Chem. Soc.*, **80**, 1339, 1958.
- [79] Shen, X., et. al., Stable aqueous dispersions of graphene prepared with, *Journal of Colloid and interface Science.*, **10**, 1016, 2010.
- [80] Dai, H., et. al., *Science.*, **319**, 1229-1232, 2008.
- [81] Lyklema, J., The surface tension of pure liquid-thermodynamic components and corresponding states. *Coll. Surf. A.*,**156**, 413- 421, 1999.
- [82] Hildebrand, J. H., et. al., *Regular and related solutions* 1st edn (Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1970.
- [83] Benedict, L. X., et. al., Microscopic determination of the interlayer binding energy in graphite. *Chem. Phys. Lett.*, **286**, 490-496, 1998.
- [84] Gardiner, D., *Practical Raman Spectroscopy*, Springer-Verlang., ISBN 978-0387502540, 1989.

- [85] Harris, D. C., Bertolucci, M. D., Symmetry and Spectroscopy: an introduction to vibrational and electronic spectroscopy, Oxford University, 1978.
- [86] Ferrari, A. C., Meyer, J. C., Scardaci, V., et. al., Raman spectrum of graphene and graphene layers. Phys. Rev. Lett., **97**, 187401, 2006.
- [87] Campbell, S. A., The Science and Engineering of Microelectronic fabrication, s.**151**, Oxford University, New York, 2001.
- [88] Dill, F. H., Optical Lithography, IEEE Transactions on electron Devices., **22**, 7, 440-444, 1975.
- [89] Mack, C. A., PROLITH: a comprehensive optical lithography model, Proceeding of SPIE., **538**: 207-220, 1985.
- [90] Hamit, M., Nanovak Inkas Termal Buharlaştırma Sistemi. <http://www.hamit.bilkent.edu.tr> for details, 2009.
- [91] Donal, A. N., SEMICONDUCTOR PHYSICS AND DEVICE, S. 157-180, Sydney, Australic. 2002.
- [92] Manukyan, S., Mechanically Exfoliated Single and Multilayer Graphene Sheets and Graphene Field Effect Transistor, Degree Master of Science, B.S., Physics, Boğaziçi University, 2008.
- [93] Chan, K. T., Neaton, J. B., Cohen, M. L., First- principles study of metal adatom Adsorption on graphene. Phys. Rev. B **77**, 235430, 2008.
- [94] Giovannetti, G. *et. al.*, Doing Graphene with Metal Contacts. Phys. Rev. Lett. **101**, 026803, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Kayseri’de doğan Muhittin ÖZTÜRK, ilköğretimini Münevver Şefik Fergar ilköğretim okulunda tamamlamıştır. Lise öğrenimini ise Yeşilhisar Yabancı Dil Ağırlıklı lisesinde tamamlamıştır. 2005 yılında kazandığı Erciyes Üniversitesi Yozgat Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü 2009 yılında başarıyla bitirmiştir.

2009 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başlamıştır. Doç. Dr. Hidayet ÇETİN danışmanlığında “Grafen Transistörlerin Elektriksel Karakteristiklerinin Belirlenmesi” başlıklı tezi hazırlamaktadır.

İletişim Bilgileri

Adres : Bozok Üniversitesi FEF Fizik Bölümü Divanlı Yolu 10. km.

66100 YOZGAT

Telefon: (541)718 64 20

E-posta: mhhtn_ozturk@hotmail.com