

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



GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERCAN ADLI

BALIKESİR, MAYIS - 2019

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



GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERCAN ADLI

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sibel GÖKDEN (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Orhan GÜRLER

Doç. Dr. Remziye TÜLEK

BALIKESİR, MAYIS- 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ercan ADLI tarafından hazırlanan “**GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 02.05.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Sibel GÖKDEN



Üye
Prof. Dr. Orhan GÜRLER



Üye
Doç. Dr. Remziye TÜLEK



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

ÖZET

GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERCAN ADLI
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI
KATIHAL FİZİĞİ
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)

BALIKESİR, MAYIS - 2019

Bu çalışmada grafitin katmanlarından biri olan, yarıiletken teknolojisinde çığır açacağı düşünülen grafen maddesi, genel ve transport özellikleri bakımından incelenmiştir. Bu madde günümüzde elektronik cihazlarda kullanılan silikon gibi yarıiletken maddelere göre daha yüksek mobilite ve termal iletkenliğe sahip olup, ısıya ve mekanik etkilere karşı dayanıklılık açısından da çok daha üstün özelliklere sahiptir. 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüş bu malzemenin ileride teknolojinin devleri arasında yer alacağı dikkate alınarak, bu tez çalışmasında grafenin yapısı, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri ve bu özelliklerin ne gibi avantaj / dezavantajlar getirdiği üzerine bir derleme çalışmaya yer verilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: grafen, transport, fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikler.

ABSTRACT

GRAPHENE AND PROPERTIES
MSC THESIS
ERCAN ADLI
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
PHYSICS
SOLID STATE PHYSICS
(SUPERVISOR: PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)

BALIKESİR, MAY 2019

In this study, the general and transport properties of graphene which is one of the layer of graphite is studied. This material has higher mobility and thermal conductivity than semiconductor materials such as silicon currently used in electronic devices, and has superior properties in terms of resistance to heat and mechanical effects. In this work, considering that this material which studies about is awarded Nobel Physics Prize in 2010, will be among the giants of technology in the future structural, physical, chemical and electrical properties of graphene and the advantages / disadvantages of these properties are specified.

KEYWORDS: graphene, transport, physical, chemical and electrical properties.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. GRAFENE TARİHSEL BAKIŞ	3
3. GRAFENİN GENEL ÖZELLİKLERİ	5
3.1 Grafenin Yapısı	5
3.2 Grafenin Fiziksel Özellikleri	6
3.3 Grafenin Kimyasal Özellikleri	7
3.4 Grafenin Elektriksel Özellikleri	8
3.5 Grafenin Optiksel Özellikleri	11
3.6 Grafenin Termal Özellikleri	12
4. GRAFENİN ELDE EDİLMESİ.....	14
4.1 Mikromekanik Teknik İle Yüksek Yönelimli Pirolitik Grafit Tabakasından Tek Tabaka İzolasyonu	14
4.2 Kaydırma Yöntemi	14
4.3 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi	15
4.4 Silisyum-Karbür Yöntemi	16
4.5 Kimyasal Ayırıştırma Yöntemi	16
5. GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI	17
5.1 Grafendeki Taşıyıcılardan İleri Gelen Saçılma Mekanizmaları.....	17
5.1.1 La Fonon Saçılması.....	18
5.1.2 RIP Fonon Saçılması.....	18
5.1.3 Sıcaklıktan Bağımsız Saçılma.....	18
5.2. Alt Taştaki Bulk (3d) Taşıyıcılardan İleri Gelen Saçılma Mekanizmaları	19
5.2.1 Akustik Fonon Saçılması	19
5.2.2 Polar Optik Fonon Saçılması	20
5.2.3 İyonize Safsızlık Saçılması	20
6. UYGULAMA ALANLARI.....	21
7. SONUÇ VE ÖNERİ	23
8. KAYNAKLAR.....	24

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Grafenin bal peteği örgü yapısı.....	2
Şekil 2.1: 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülen Rus kökenli İngiliz bilim insanı Kostya S. Novoselov ve Hollandalı bilim insanı Andre Geim.....	4
Şekil 3.1: Karbon elementinin allotropları.....	5
Şekil 3.2: Tek katmanlı grafen tabakası.....	6
Şekil 3.3 : Grafende elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi:(1) grafen fiber, (2) grafen /PEDOT(polietilendioksitiyofen), (3) grafen/CNT(karbon nanotüp), (4) grafen /CNT/PEDOT karma fiber	9
Şekil 3.4: Aynı sıcaklıktaki GA-S, GA-S-1500C ve diğer yüksek elektrik iletkeni grafen aerojellerde elektriksel iletkenliğin yoğunluğa bağlı değişim grafiği.....	10
Şekil 3.5: Yarıiletken ve grafenin bant yapılarının karşılaştırması.....	11
Şekil 4.1: Selobant ile ayrıştırılan grafen tabakaları.....	14
Şekil 4.2: Karbon gazı Nikel yüzey üzerine çöker, kimyasal aşındırıcı ile grafen tabakalar ayrı olarak elde edilir. Kullanılacak olan biriktirme yüzeyi epitaksiyel olarak grafene uyumlu olmalıdır...	15
Şekil 4.3: SiC tabakalarının ısıtılarak grafen sentezi (a) Siyah renk ile tasvir edilen atomlar karbonu, turuncu renk ile tasvir edilen atomlar silikonu göster-mektedir (b) Isıl işlem sırasında kalan üst tabakanın grafene dönüşmesi (c) Bu işlemler sırasında meydana gelen yapı kusurları	16
Şekil 6.1: Grafen ile üretilen esnek ekran.....	22

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

n_s	:	Taşıyıcı yoğunluğu
q	:	Elektrik yükü
R_H	:	Hall katsayısı
V_H	:	Hall voltajı
I_H	:	Hall akımı
B	:	Manyetik Alan
μ_{2D}	:	Grafende iki boyutlu toplam mobilite
LA	:	Akustik fonon saçılması
μ_{LA}	:	Akustik fonon saçılmasından kaynaklı mobilite
RIP	:	Uzaklaştırılmış ara-yüzey fonon saçılması
μ_{RIP}	:	Uzaklaştırılmış ara-yüzey fonon saçılmasından kaynaklı mobilite
μ_0	:	Sıcaklıktan bağımsız mobilite
D_A	:	Deformasyon potansiyeli
ρ_s	:	Grafenin 2 boyutlu kütle yoğunluğu
v_S	:	Boyuna akustik fonon hızı
v_F	:	Grafenin Fermi hızı
k_B	:	Boltzmann sabiti
C_i	:	Çiftlenim gücü
E_i	:	Fonon enerjisi ile ilişkili fit parametresi
μ_C	:	Coulomb saçılması
μ_{SR}	:	Kısa menzilli saçılma
E_D	:	Deformasyon potansiyeli
PE	:	Piezoelektrik
k	:	Elektron dalga vektörü
q_{S3D}	:	3-boyutlu ters örgü perdeleme uzunluğu
$f(E)$:	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
$N(E)$:	Durum yoğunluğu fonksiyonu
K	:	Elektromekanik çiftlenim sabiti
$\hbar\omega_{PO}$:	Polar optik enerjisi
τ_m	:	Momentum durulma zamanı
k_B	:	Boltzman sabiti
m^*	:	Etkin kütle
Z	:	İyonize atomun yükü
N_{imp}	:	İyonize safsızlık yoğunluğu
λ_D	:	3 boyutlu perdeleme uzunluğu
ϵ_S	:	Statik dielektrik sabiti
CNT	:	Karbon nanotüp
GNR	:	Grafen nanoribonlar
AFM	:	Atomik kuvvet mikroskobu
TEM	:	İletim elektron mikroskopi
STM	:	Taramalı tünelleme mikroskobu
CNT	:	Karbon nanotüp
PEDOT	:	Polietilendioksitiyofen

FET : Alan etkili transistör
CVD : Kimyasal buhar biriktirme metodu

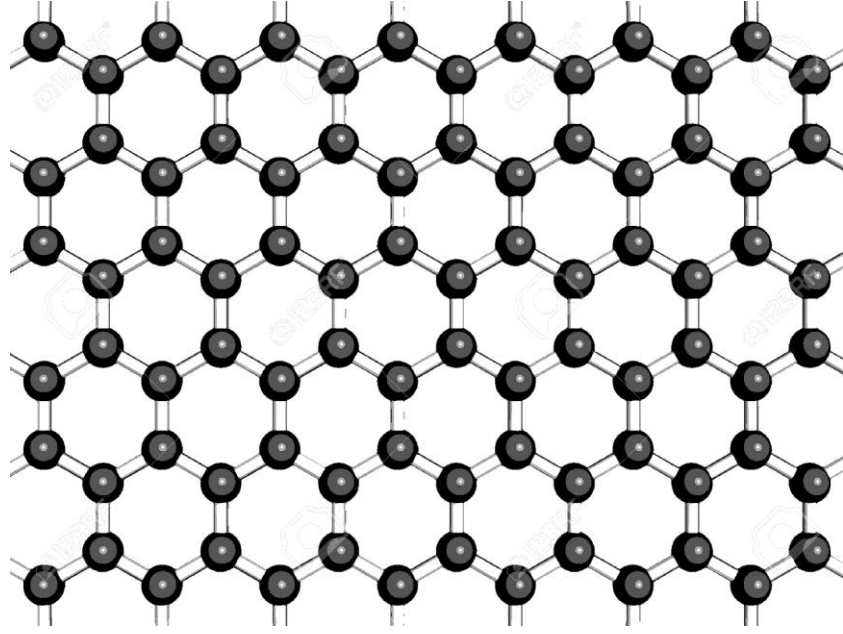
ÖNSÖZ

Bu çalışma sırasında desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen ; sabrı ve ilgisi ile bu çalışmayı tamamlamamı sağlayan değerli Hocam Prof. Dr. Sibel GÖKDEN'e, manevi desteği ile her zaman yanımda olan motivasyon ve neşe kaynağım eşim İlknur ADLI'ya, bana her zaman inanan ve desteğini her nefesimde hissettiğim dünyanın en iyi annesi annem Tülin ADLI'ya çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Grafenin yapıtaşı karbon atomlarıdır. Karbon atomu 4 bağ yapar ve her bağın farklı bir karbon atomu ile yapılması elmas yapıyı oluşturur. Bağ sayısı ve bağlanma şekline dikkat edilmeksizin oluşan yapılar kristal yapıda oluşmazlar. Amorf yapıdadırlar (kömür). Bir karbon atomunun sadece üç farklı karbon atomu ile bağ yapması durumunda bir karbon atomu ikili bağ yapmak zorunda kalır. Böylece de Grafit yapı oluşur. Grafitin yalnızca bir atom kalınlığında ayrılmış hali grafen olarak adlandırılır. Grafen, sadece karbon atomundan oluşan polimerik bir yapıdır yani karbon atomunun allotropudur. Karbon atomları grafende 6'lı halkalar şeklinde (bal peteği benzeri) birbirlerine bağlanır ve çift bağların yerleri hiçbir direnç göstermeden değişebilir. Bu durumda grafenin iki boyutlu olduğunu söyleyebiliriz. Bu iki boyutlu madde üzerinde dalgalanmalar bulundurulur. Bu durumu gayet ince katmanlı bir streçin gerilmeden serbest bırakıldığında üzerinde girinti ve çıkıntıların oluşmasına benzetebiliriz. Grafeni oluşturan karbon atomları arasındaki çift bağların kolaylıkla yer değiştirebilmesi grafene muhteşem bir iletim kapasitesi sağlar. Grafen içinde elektronlar neredeyse fotonlar gibi hareket eder ve 800000 m/s gibi büyük bir hızla ulaşabilirler [1]. Bu özellik, grafeni çekici kılan avantajların başında gelmektedir. 2004'te Rus kökenli İngiliz bilimadamı Kostya S. Novoselov ve Hollandalı bilimadamı Andre Geim grafeni tek tabaka halinde sentezlemeyi başarmış ve beklenenden çok daha değişik elektronik ve fiziksel özelliklere sahip olduğunu ispatlayarak 2010 Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Bu madde günümüzde elektronik cihazlarda kullanılan silikon gibi yarıiletken maddelere göre yük hareketi imkanı, ısıya ve mekanik etkilere karşı dayanıklılık açısından çok daha üstün özelliklere sahiptir. Yüksek taşıyıcı mobilitesine ($15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) [2], 75°C ile 200°C arasında yüksek sıcaklık direncine, yüksek termal iletkenliğe (5000 W/mK) [3] ve yüksek gerilme direncine sahiptir[4]. Ayrıca grafen transistörlerin, elektrik akımına karşı düşük direnci olması nedeni ile soğutulma ihtiyacı yoktur.

Şekil 1.1'de grafenin bal peteği örgü yapısı görülmektedir.



Şekil 1.1 : Grafenin bal peteği örgü yapısı.

2. GRAFENE TARİHSEL BAKIŞ

1930'da grafenin iki boyutlu kristal yapı gösterdiğini Landau ve Peierls termodinamik yasalara bağlayarak açıklamışlardır. 1947'de P.R Wallace grafenin bant yapısını hesaplamıştır. Linus Pauling 1957 yılında grafenin elektronik yapısı ve özelliklerine, yayınladığı makalelerle ışık tutmuştur. 1980'e kadar karbonun sadece 3 temel formu olduğu sanılırken (elmas, grafit, amorf karbon(kömür)) grafenin yüksek kalitede 2 boyutlu kristallerden meydana geldiği ispatlanmıştır. Grafen yüzyıllarca kurşun kalem veya benzeri grafit uygulamaları kullanılarak farkında olunmadan elde edildi fakat laboratuvar ortamında ölçülebilir üretimi ve izolasyonu 2004'te gerçekleşti. Rus kökenli İngiliz bilimadamı Kostya S. Novoselov ve Hollandalı bilimadamı Andre Geim grafeni tek tabaka halinde sentezlemeyi başarmış ve beklenenden çok daha değişik elektronik ve fiziksel özelliklere sahip olduğunu ispatlamışlardır [5] ve bilgisayar işlemcilerini inanılmaz hızlara çıkarma potansiyeli olan grafenle ilgili çalışmaları nedeniyle 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Araştırmaları, grafenin 2 boyutlu dizilişi, yapısı ve özelliklerinin teorik açıklamalarını kapsamaktadır. Yüksek kaliteli grafenin sürpriz bir şekilde kolay izole edilebileceğinin kanıtlanması da grafen hakkında daha çok araştırmayı mümkün kıldı.

Grafen terimi ilk kez 1987'de tek tabaka grafit yapraklarını tanımlamak için kullanılmıştır. Terim aynı zamanda karbon nanotüplerin ilk açıklamalarında kullanılmıştır. Önceleri, grafit tabakalar, karbon tabakalar ya da karbon yapraklar gibi açıklamalar grafen terimi yerine kullanılmıştı. Fakat bunlar yanlış kullanımlardı. Çünkü üç boyutlu bir yapı olan grafit ile tek katmanlı grafeni tanımlamak doğru değildir. Grafen terimi grafit ile sadece yapısal ilişkilerde ya da her bir katmanın özellikleri ayrı ayrı tartışıldığında kullanılmalıdır. Geim'in tanımına göre grafen çevreden izole edilmiş tekli atomik grafit yüzeyidir.



Şekil 2.1: 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülen Rus kökenli İngiliz bilim insanı Kostya S. Novoselov ve Hollandalı biliminsanı Andre Geim.

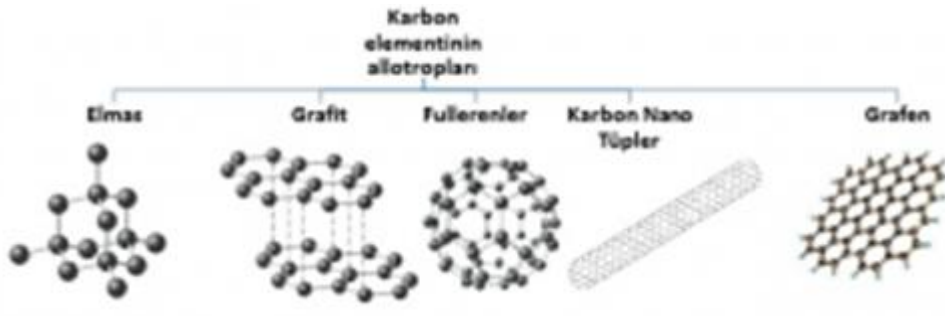
3. GRAFENİN GENEL ÖZELLİKLERİ

3.1 Grafenin Yapısı

Peryodik tablonun altı nolu elementi olan karbon (C) atomu en dış yörüngelerindeki elektronlarını ortaklaşa kullandıkları kovalent bağlarla birbirlerine bağlanarak, uzayda çok farklı şekillerde dizilebilmektedir. Karbon atomu 4 bağ yapar. Her bir bağ farklı karbon atomu ile yapılır. Böylece bir karbon atomu 4 farklı karbon atomuna bağlanır. Bu durum Elmas yapısını oluşturur. Elmas yalıtkandır ve fiziksel ve kimyasal etkilere karşı çok dayanıklıdır. Bir karbon atomu, sadece üç (3) farklı karbon atomu ile bağ yaparsa bu atomlardan biri ile ikili bağ yapmak zorunda kalır. Böylece de Grafit yapı oluşur. Grafit yarıiletken ve fiziksel ve kimyasal etkilere karşı elmas kadar dayanıklı değildir. Bağ sayısı ve bağlanma şekline dikkat edilmeksizin oluşan yapılar ise kristal yapıda oluşmazlar. Amorf yapıdadırlar (Kömür).

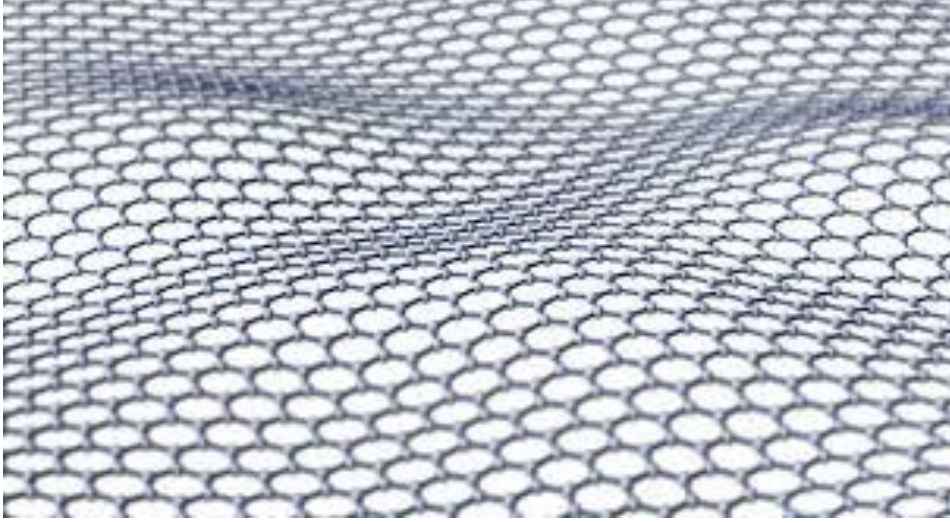
Grafen, sadece karbon atomundan oluşan polimerik bir yapıdır (karbon atomunun allotropudur). Karbon atomlarının 6'lı halkalar şeklinde (bal peteği benzeri) birbirlerine bağlanmış şeklidir, çift bağların yerleri hiçbir direnç göstermeden değişebilir. Böylece dirençsiz bir iletim sağlar.

Şekil 3.1'de karbon (C) atomunun uzay dizilişlerindeki farklılıklarına göre allotropları görülmektedir.



Şekil 3.1: Karbon elementinin allotropları.

Grafen, ilk olarak kurşun kalemlerin kağıt üzerine yazmasını sağlayan grafitin, yalnızca bir atom kalınlığında tabakaya ayrılması ile ilgi odağı olmaya başlamıştır. Şekil 3.2’de tek katmanlı grafen tabakası görülmektedir.



Şekil 3.2 : Tek katmanlı grafen tabakası.

3.2 Grafenin Fiziksel Özellikleri

2004'te Novoselov tarafından 2 boyutlu grafenin deneysel keşfi elektronik materyal bilimi için ufuk açıcı bir olaydır [6].

Grafen şimdiye dek test edilen en güçlü materyallerden biridir. Dalgalı yapı gösterir. 2 boyutta düzlemsel bir şekilde durabilmesi için destek bir alt tabakaya ihtiyaç duyar.

Çelikten 200 kat daha dayanıklı olan grafen çok geniş yüzey alanına ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$) sahiptir [4]. Grafenin endüstride ekonomik olarak kullanılması için, doğal yollarla gerçekleşen grafitten elde etme dışında bazı teknolojik gelişmeler gerekmektedir. Bükülebilir bir maddedir.

Grafen tabakası küresel halde yuvarlandığında sıfır boyutlu yapı fulleren, silindirik şekli verildiğinde tek boyutlu karbon nanotüp, grafen tabakalarının üst üste dizilmesiyle de 3-boyutlu grafit oluşur.

Yüksek geçirgenliğe sahip grafen tek bir tabaka beyaz ışığın sadece %2.3 ünü absorplar.

Ağ yapılı olmasına rağmen grafenin altılı halkaları o kadar küçüktür ki, bir helyum atomunun bile bu halkalardan geçmesi mümkün değildir.

Yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir ($15000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$).

Yüksek termal iletkenliğe sahiptir (5000 W/MK).

Yüksek gerilme direncine sahiptir.

Yüksek sıcaklık direncine sahiptir (-75 ile 200°C arasında grafenin özelliklerinde bir değişiklik gözlenmiyor.).

Grafen transistörler düşük direnci nedeni ile soğutulma ihtiyacı duymaz.

3.3 Grafenin Kimyasal Özellikleri

Grafen iki boyutlu yapısı dolayısıyla her bir atomunun iki tarafından da kimyasal reaksiyona girmesi mümkün olan tek karbon formudur. Grafen yaprağının kenarlarındaki atomlar özel kimyasal tepkimelere sahiptir. Yapraklardaki kusurlar kimyasal tepkimeyi arttırır.

Tek katmanlı grafenin temel yüzeyi ile oksijen gazı arasındaki başlangıç tepkime sıcaklığı 533K 'nin altındadır. Grafen düşük sıcaklıkta (yaklaşık 620 K) yanar.

2013'te Stanford Üniversitesi Fizikçileri tek katmanlı grafenin kalın yapraklara göre kimyasal olarak 100 kat daha reaktif olduğunu söylemişlerdir [7].

Grafen düzenli kristalik yapı gösterir. Grafen yapısında karbon-karbon bağ uzaklığı yaklaşık olarak 1.42 Angstrom'dur. Bir çift bir tek bağ olacak şekilde konjuge sistemlidir. Grafen nanoribonlarda (GNR) düşük alanlı taşıyıcı transportunu çeşitli saçılma mekanizmaları etkiler. Bu mekanizmaların içlerinden en etkili olanları, akustik ve optik fonon, yüklü safsızlıklar ve kenar pürüzlülük saçılmalarıdır.

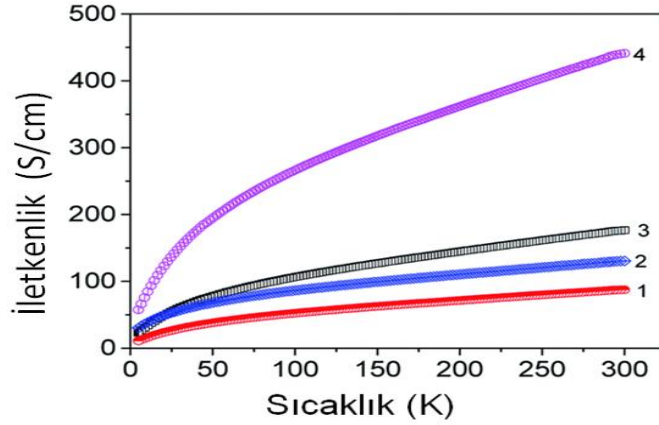
Grafendeki karbon atomları arasındaki bağlar ona sağlam malzeme olma özelliği kazandırmıştır. p_x , p_y ve s orbitallerinden oluşan 120° açılı sp^2 hibritleşmesi ve sıkıca paketlenmiş karbon atomları sayesinde grafen sağlam bir dengededir. Grafenin kristal yapısı Bravais örgü değildir. Grafenin karbon atomları düzenli bir hexagonal şekilde dizilmiştir. Grafenin hexagonal örgüsü, iki üçgensel örgünün birleşimi olarak kabul edilebilir. Bu bakış açısı, tekil grafit tabakasının bant yapısını hesaplamak için başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Her grafen atomu dört bağa sahiptir. Grafende sigma ve pi bağları mevcuttur. pi bağı yüzeyden dışarı doğrudur. Bununla birlikte grafitteki grafen katmanlar arasındaki çekim kuvvetleri oldukça zayıftır. Kurşun kalemi kağıda sürtünce bu zayıf çekim kuvvetleri yenilerek grafen tabakalarının kağıt yüzeyinde kalması sağlanır. Bu tabakalar yazı izlerini oluşturmaktadır.

3.4 Grafenin Elektriksel Özellikleri

Grafen yasak enerji aralığı olmayan bir yarıiletkenidir. Çünkü grafenin iletim ve valans bantları Dirac noktasında buluşur. Grafendeki elektron dalgaları tekli atom katmanları içinde yayılır.

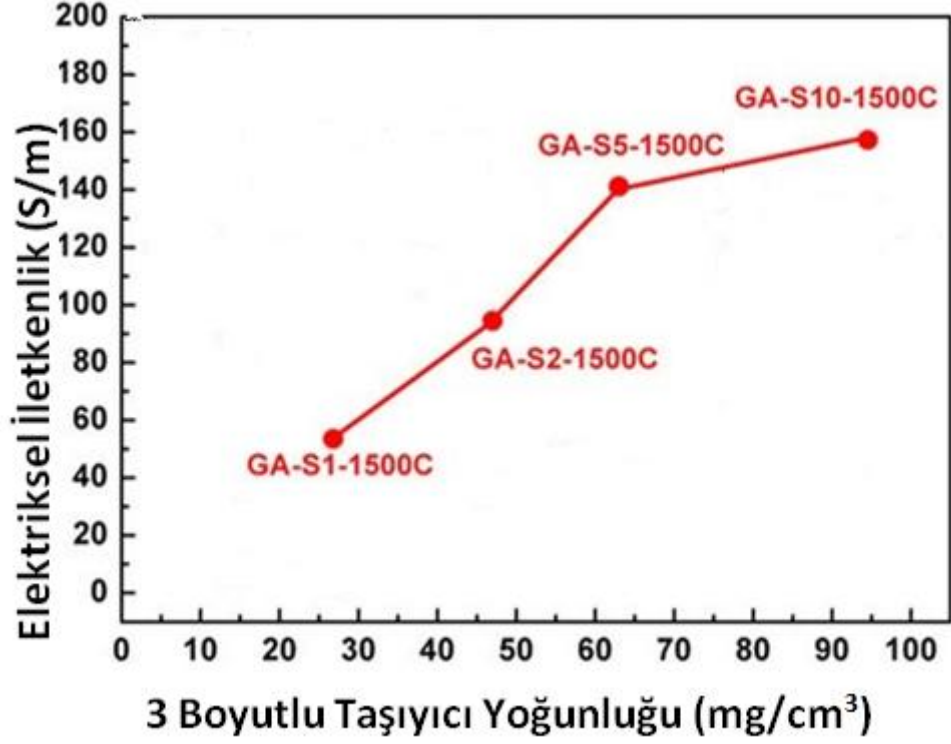
Grafen oda sıcaklığında $15000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'den fazla değerde ölçülen dikkat çekici elektron mobilitesini gözler önüne serer [2]. Hol ve elektron mobilitesinin yaklaşık olarak özdeş olduğu düşünülür. Mobilite 10 K ile 300 K arasında neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır [8].

Bazı grafen formları için elektriksel iletkenliğinin sıcaklık ile değişim grafiği Şekil 3.3'teki gibidir.



Şekil 3.3 : Grafende elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi. (1)grafen fiber, (2) grafen /PEDOT(polietilendioksitiyofen), (3) grafen/CNT(karbon nanotüp), (4) grafen /CNT/PEDOT karma fiber [10].

Bu grafiğe göre belirli sıcaklık değerlerinden sonra elektriksel iletkenlik neredeyse sıcaklıktan bağımsız hale geçer. Bu durum baskın saçılma mekanizmasının kusur (defect) saçılması olduğu anlamına gelir. Grafenin akustik fonon saçılması, oda sıcaklığı mobilitesini $200000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ değerinde 10^{12} cm^{-2} taşıyıcı yoğunluğunda limitler. Bu değer bakırınkinden 10^7 kat daha büyüktür. Grafen yapraklarının öz direnci $10^{-6} \Omega.\text{cm}$ 'dir. Bu gümüşün öz direncinden daha azdır. Ayrıca SiO_2 alt taşlarında optik fononlardan kaynaklı saçılma, grafenin kendi fononlarının sebep olduğu saçılmadan daha etkilidir. Bu $40000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'lik mobiliteye izin verir. Grafen aerojellerde yoğunluk arttıkça elektriksel iletkenlik de artmaktadır [4]. Bu doğru orantı Şekil 3.4'teki gibidir.



Şekil 3.4: Aynı sıcaklıktaki GA-S, GA-S-1500C ve diğer yüksek elektrik iletkeni grafen aerojellerde elektriksel iletkenliğin yoğunluğa bağlı değişim grafiği [4].

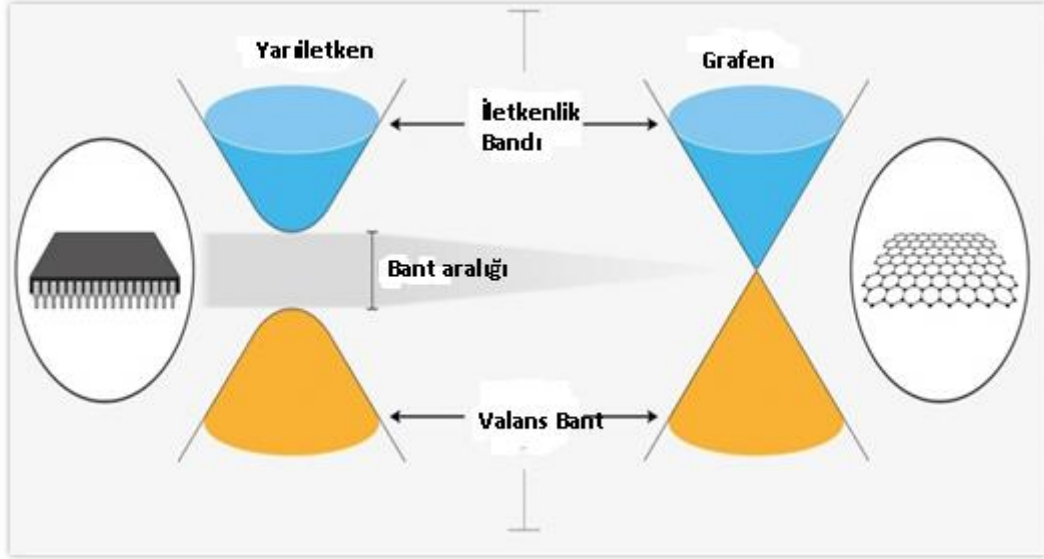
Grafen yüzeylerin bir tabaka ile korunması 2015'in Ocak ayında gerçekleşmiştir. Yüzeyi alüminyum oksitle korunan grafen cihaz süper iletkenlik göstermiştir. Grafenin 40 nanometre genişliğindeki nanoşeritleri, elektronların şerit kenarı boyunca sorunsuz akmasına izin verir.

Hall etkisi ölçüm tekniği ile grafendeki taşıyıcıların mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları belirlenirken, düşük sıcaklık ve yüksek manyetik alanlarda grafen elektronlarının olağanüstü hareketliliği sayesinde kuantum Hall etkisi, hem elektronlar hem de holler için gözlemlenmiştir. Eşsiz bant yapısı sayesinde grafenin elektriksel iletkenliği oldukça yüksektir. Yarı dolu bantlar elektronların serbestçe hareket etmesine izin verir.

Grafende, yapısı gereği bant aralığı yoktur (Şekil 3.5). Algılama ve transistör uygulamaları için grafenin bant aralığı istenilen şekilde ayarlanabilir. Son zamanlarda, oda sıcaklığında çift geçitli çift katmanlı alan etkili grafen transistörlere

voltaj uygulanarak grafenin bant aralığının 0'dan 0.25 eV'a (yaklaşık 5 mikrometre'ye) çıkarılabileceği kanıtlanmıştır [9].

Grafende bulunan elektronların kütleleri ise sıfır sayılabilecek kadar küçüktür. Bu sebepten dolayı grafen elektronlar kütlesiz Dirac fermiyonları diye de anılmaktadır.



Şekil 3.5: Yarıiletken ve grafenin bant yapılarının karşılaştırılması [10].

Sıradan metallerde, elektron saçılması enerji kaybına ve ısının açığa çıkmasına sebep olur. Grafen içindeki elektronlar kütlesiz fotonlar gibi davranabilirler.

Grafendeki elektronların hızları da ışık hızına göre oldukça küçüktür, ancak Schrödinger denklemi yerine ışık hızına sahip fermiyonları betimleyen Dirac denklemine uyarlar.

3.5 Grafenin Optiksel Özellikleri

Grafen'in % 2.3'lük bir beyaz ışık emilim kabiliyeti de, özellikle sadece 1 atom kalınlığında olduğu göz önüne alındığında benzersiz ve ilginç bir özelliktir. Bu, yukarıda belirtilen elektronik özelliklerinden kaynaklanmaktadır; elektronlar çok yüksek hareket kabiliyetine sahip kütlesiz taşıyıcılar gibi davranırlar. Birkaç yıl önce,

absorbe edilen beyaz ışığın miktarının malzeme özelliklerine göre değil, İnce Yapı Sabitine dayandığı kanıtlandı. Başka bir grafen katmanı eklemek, yaklaşık olarak aynı değer (% 2.3) tarafından emilen beyaz ışık miktarını artırır. Grafenin opaklığı \approx % 2.3, görünür frekans aralığında evrensel dinamik iletkenlik değeri olan $G = e^2/4\hbar$ (\pm % 2-3)'e eşittir.

Bu etkileyici özelliklerden ötürü, optik yoğunluğun belirli bir eşiğe (doygunluk akışı olarak da bilinir) ulaştığında, doyurulabilir soğurmanın gerçekleştiği (çok yüksek yoğunluklu ışığın soğurmada bir azalmaya neden olduğu) gözlenmiştir. Bu, fiber lazerlerin mod kilitlenmesi açısından önemli bir özelliktir. Grafenin dalga boyuna duyarlı olmayan ultra hızlı doygun emilim özellikleri nedeniyle, tam bant modu kitlemesi, 30 nm'ye kadar büyük dalga boyu ayarlaması yapabilen bir erbiyum katkılı dağıtıcı soliton fiber lazer kullanılarak gerçekleştirildi.

Grafen ve grafen oksit sistemler, optiksel özelliklerin ayarlanabilir olduğu elektromik davranış sergilerler. Grafenin bant baralığı 0'dan 25 eV'a ayarlanabilir. Bu da yaklaşık 5 mikrometrelik dalgaboyuna denk gelir. Bu ayarlama işlemi çift kapılı bilayer grafen alan etkili transistor (FET)'e voltaj uygulayarak yapılır.

3.6 Grafenin Termal Özellikleri

Boyutu 20 nanometreden az olan grafen tabakalar termodinamik olarak kararsızdır. Grafen 6000 atoma kadar en az kararlı olan yapıdır. 24000 atomdan daha geniş moleküller için grafen, grafitin içindeki gibi en kararlı fulleren haline gelir.

Grafende termal transport dikkat çekici ve reaktif bir araştırma alanıdır. Asılı grafenin termal iletiminin ölçümleri $5300 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'lik son derece yüksek bir değer verir [3]. Bu değer grafitin oda sıcaklığında yaklaşık olarak $2000 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [3] değerindeki termal iletiminden çok daha fazladır. Son çalışmalar bu verilen değerinden fazla olabileceği üzerinde durmaktadır. Bu fark büyük ölçüm hatalarından, grafenin kalite varyasyonlarından veya işlem şartlarından kaynaklanıyor olabilir. Tek katmanlı grafen bir amorf materyal ile desteklendiğinde termal iletim oda sıcaklığında $500\text{-}600 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ değerlerine iner [3]. Bunun sebebi, alt taş tarafından

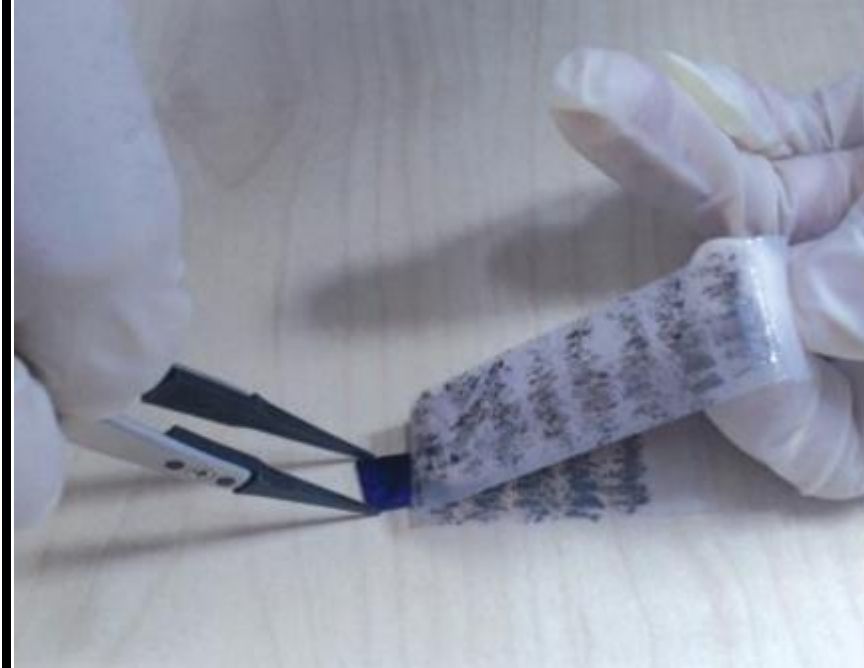
grafenin örgü dalgalarının saçılması veya amorf oksit içerisinde bazı grafen tabakalarının örtülmesidir. Aynı şekilde, polimerik tortular bilayer asılı grafende termal iletimin benzer şekilde yaklaşık $500-600 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'lere düşmesine katkı sağlayabilir [11]. Tek geçitli grafen şerit için düşük sıcaklıklarda $k_B T$ 'den daha büyük Fermi enerji değişiminin sebep olduğu sapmalar, termal iletkenliğe elektronik katkının artmasına ve fonon katkısından daha baskın hale gelmesine sebep olur.

4. GRAFENİN ELDE EDİLMESİ

Grafen fiziksel ve kimyasal yöntemlerle sentezlenmektedir. Aşağıda grafenin elde edilme yöntemleri sıralanmıştır.

4.1 Mikromekanik Teknik İle Yüksek Yönelimli Pirolitik Grafit Tabakasından Tek Tabaka İzolasyonu

Grafit yüzeylere yapıştırılıp çekilen bir selobant üzerinde grafen tabakalar elde edilir (Şekil 4.1). Bu yöntem ile elde edilen grafen tabakalar diğer yöntemlerle elde edilenlere göre çok kalındır ve yüzey alanı düşüktür. Bu sebeple bu yöntem grafen elde etmek için çok uygun değildir.



Şekil 4.1: Selobant ile ayrıştırılan grafen tabakaları.

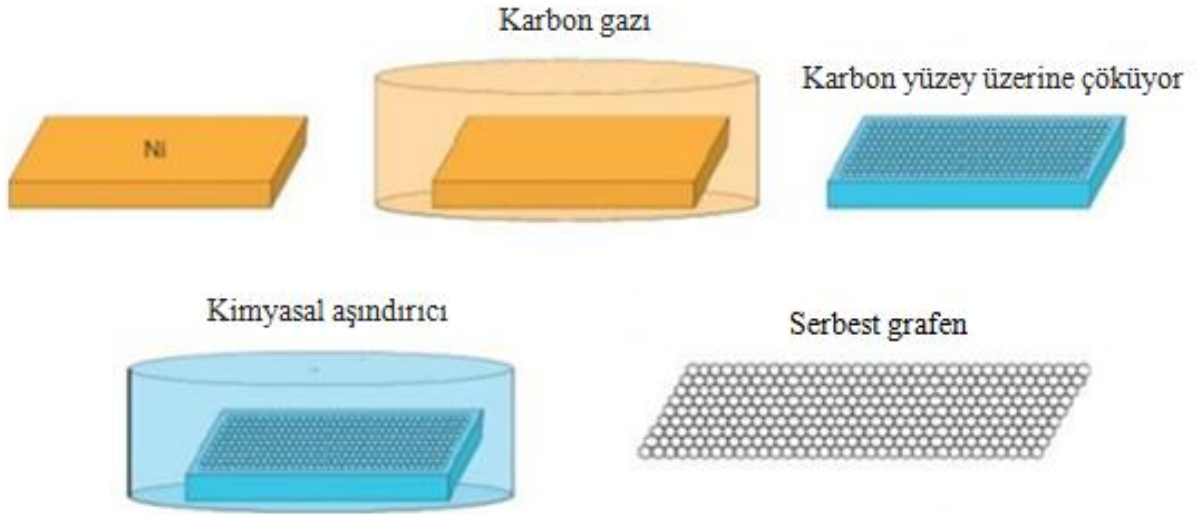
4.2 Kaydırma Yöntemi

Grafit tabakası bir yüzey üzerinde kaydırılır ve böylece grafen tabakaların ayrışması sağlanır. Grafitin selobant ile katmanlarının ayrıştırılması da bu metot

içerisinde değerlendirilir. Grafenin ilk kez sentezlenmesi Manchester grubu tarafından bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metod ile 100 mikrometre uzunlukta grafen parçacıkları sentezlenebilmektedir.

4.3 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

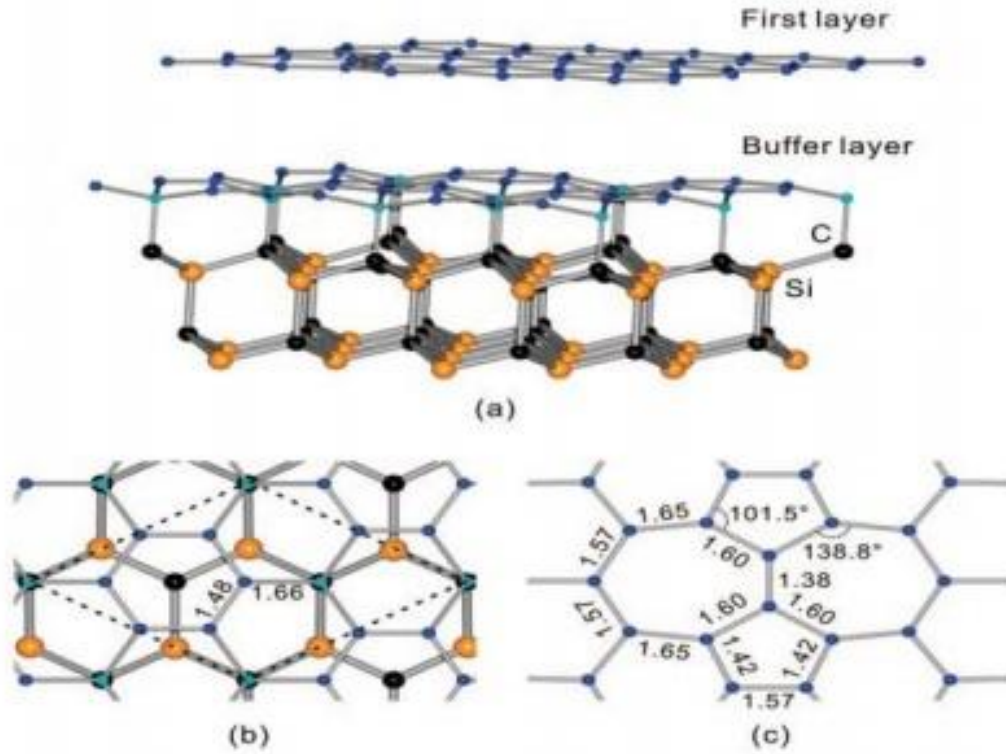
Grafen üretimi için bir çok yöntem bulunur fakat verimli ve kaliteli bir üretim metodu olarak kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD) kabul görmektedir [12]. Diğer metodlarla elde edilen grafen katmanların kusurlar içerdiği bilinmektedir. Bu yöntem kusursuz grafen katmanları üretmek için uygundur. Grafen tabakaları CVD tekniği ile ilk olarak Nikel üzerine biriktirilmiştir [12]. Yöntem temel olarak, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, metal üzerine buhar haldeki karbon atomlarının biriktirilmesi ve yüzeyden alınması esasına dayanır [13].



Şekil 4.2: Karbon gazı Nikel yüzey üzerine çöker, kimyasal aşındırıcı ile grafen tabakalar ayrı olarak elde edilir. Kullanılacak olan biriktirme yüzeyi epitaksiyel olarak grafene uyumlu olmalıdır.

4.4 Silisyum-Karbür Yöntemi

Bu yöntemde silisyumkarbür 1100 °C'ye kadar ısıtılır ve silisyum atomları buharlaştırılır. Buharlaştırma sonucunda Şekil 4.3'teki gibi süblimleşen silisyum atomları ardında kalan karbon atomları kendi aralarında epitaksiyel olarak grafen oluşturur. Oluşan grafen parçacıkları küçük boyuttadır.



Şekil 4.3: SiC tabakalarının ısıtılarak grafen sentezi (a) Siyah renk ile tasvir edilen atomlar karbonu, turuncu renk ile tasvir edilen atomlar silikonu göstermektedir (b) Isıl işlem sırasında kalan üst tabakanın grafene dönüşmesi (c) Bu işlemler sırasında meydana gelen yapı kusurları.

4.5 Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi

Grafit tabakalarının arasına bazı kimyasal maddeler eklenir ve kimyasal tepkime sonucunda grafit atomu grafen tabakalara ayrılır. Sitrik asit bu tepkimelerde kullanılan kimyasallara örnektir.

5. GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI

Taşıyıcılar bir yarıiletken içerisinde hareket ederken çeşitli saçılmalara maruz kalırlar. Saçılmaya uğrayan taşıyıcıların enerjisinde, momentumunda, mobilitesinde (hareketliliğinde) değişimler meydana gelir. Bu nedenle de cihaz tasarımı ve üretiminde ve de bunların transport özelliklerinin araştırılmasında mobilite oldukça önemli bir parametredir. Transport ölçümleri Hall Etkisi deneyi ile gerçekleştirilir. Böylece hem mobilite hem de iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklığa bağlı değişimi elde edilir. Teorik olarak da saçılma mekanizmaları altında mobilite hesaplamaları yapılır ve bu sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak düşük ve yüksek sıcaklıklarda mobilitayı etkileyen saçılma mekanizmaları belirlenir. Mobilitayı etkileyen saçılma mekanizmalarının bir kısmı, grafenin epitaksiyel olarak büyütüldüğü alt taştan (substrate) bir kısmı da grafenin kendisinden kaynaklanır. Grafende başlıca saçılma mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir

5.1 Grafendeki Taşıyıcılardan İleri Gelen Saçılma Mekanizmaları

SİC üzerine büyütülen grafende iki boyutlu toplam mobilitaya (μ_{2D}) , katkı, boyuna akustik (LA) fonon saçılmasından kaynaklı mobilite (μ_{LA}) , uzaklaştırılmış ara-yüzey fonon (RIP) saçılmasından kaynaklı mobilite (μ_{RIP}) ve sıcaklıktan bağımsız mobilite (μ_0) den ileri gelir ve iki boyutlu toplam mobilite (μ_{2D}) Matthiessen's kuralı ile aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{1}{\mu_{2D}} = \frac{1}{\mu_{LA}} + \frac{1}{\mu_{RIP}} + \frac{1}{\mu_0} \quad (5.1)$$

5.1.1 La Fonon Saçılması

Grafende LA fonon saçılmasına ait mobilite eşitliği, aşağıdaki gibi verilir.

$$\mu_{LA} = \frac{4e\hbar\rho_S v_S^2 v_F^2}{n_{2D}\pi D_A^2 k_B T} \quad (5.2)$$

Burada, D_A , ρ_S , v_S , v_F ve k_B simgeleri sırasıyla deformasyon potansiyelini, grafenin 2 boyutlu kütle yoğunluğunu, boyuna akustik fonon hızını, grafenin Fermi hızını ve Boltzmann sabitini göstermektedir.

5.1.2 RIP Fonon Saçılması

Grafen tabakasının yüzeyindeki ve alt yüzeyindeki optik fononlar, grafende RIP saçılmasına sebep olur. Bu saçılmadan kaynaklı mobilite eşitliği de

$$\mu_{RIP} = \frac{1}{n_{2D}e} \left[\sum_i \left(\frac{C_i}{\exp\left(\frac{E_i}{k_B T}\right) - 1} \right) \right]^{-1} \quad (5.3)$$

ile verilir. Burada C_i ve E_i sırasıyla, çiftlenim gücü ve fonon enerjisi ile ilişkili fit parametreleridir.

5.1.3 Sıcaklıktan Bağımsız Saçılma

Coulomb saçılmasından (μ_C) ve kısa menzilli saçılma (μ_{SR})'yi de içeren sıcaklıktan bağımsız saçılma mobilitesi (μ_0) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_C} + \frac{1}{\mu_{SR}} \quad (5.4)$$

Kısa menzilli saçılmadan kaynaklı mobilite $\mu_{SR} = A/n_{2D}$ 'dir. Burada, A sabit bir değerdir. Ayrıca μ_C de sabit olup, her bir saçılma teriminin μ_0 'a katkısını hesaplamak mümkündür.

5.2. Alt Taştaki Bulk (3d) Taşıyıcılardan İleri Gelen Saçılma Mekanizmaları

Akustik ve optik fonon saçılması ile iyonize safsızlık saçılması, alt taştan ileri gelen mobilitayı sınırlayan bir saçılma mekanizmalarıdır. Aşağıda bu saçılma mekanizmalarına yer verilmiştir.

5.2.1 Akustik Fonon Saçılması

Akustik fonon saçılması, deformasyon potansiyeli (DP) ile piezoelektrik (PE) polarizasyon alanlarını içerir. Mobilitayı sınırlayan deformasyon potansiyelinden saçılmanın ortaya koyduğu mobilita aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\mu_{DP} = \frac{\pi \hbar^3 C_{LA} e}{E_D^2 k_B T m^* k} \left[1 - \frac{q_{s3D}^2}{k^2} + \frac{q_{s3D}^4}{8k^2} \left(3 \ln \left[1 + \left(\frac{2k}{q_{s3D}} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + \left(\frac{q_{s3D}}{2k} \right)^2} \right) \right]^{-1} \quad (5.5)$$

Burada, E_D , deformasyon potansiyeli; k , elektron dalga vektörü ve q_{s3D} , 3-boyutlu ters örgü perdeleme uzunluğudur ve

$$q_{s3D}^2 = -\frac{e^2}{\epsilon_s} \int \frac{d f(E)}{d E} N(E) d(E) \quad (5.6)$$

şeklinde verilir. Bu ifadede, $f(E)$, Fermi-Dirac Dağılım Fonksiyonu ve $N(E)$ de durum yoğunluğu fonksiyonudur. Mobilitayı sınırlayan Piezoelektrik Saçılmadan kaynaklı mobilita aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\mu_{PE} = \frac{2\pi \epsilon_s \hbar^3 k}{K^2 e k_B T m^{*2}} \left[1 - \frac{q_{s3D}^2}{k^2} + \frac{q_{s3D}^4}{8k^2} \left(3 \ln \left[1 + \left(\frac{2k}{q_{s3D}} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + \left(\frac{q_{s3D}}{2k} \right)^2} \right) \right]^{-1} \quad (5.7)$$

Bu ifadede K , elektromekanik çiftlenim sabitidir. Bu durumda mobilitayı sınırlayan toplam akustik fonon mobilitesi, Matthiessens's kuralı ile hesaplanır;

$$\frac{1}{\mu_{AC}} = \frac{1}{\mu_{DP}} + \frac{1}{\mu_{PE}} \quad (5.8)$$

5.2.2 Polar Optik Fonon Saçılması

Yüksek sıcaklıkta baskın saçılma mekanizması olan polar optik fonon saçılması aşağıdaki eşitlikle ifade edilmiştir.

$$\mu_{PO(Bulk)} = \frac{e \tau_m}{m^*} e^{\hbar\omega_{PO}/k_B T} \quad (5.9)$$

Bu ifadede $\hbar\omega_{PO}$ polar optik enerjisi olup, τ_m , momentum durulma zamanı ve k_B ise Boltzman sabitidir.

5.2.3 İyonize Safsızlık Saçılması

Bir elastik saçılma süreci olan iyonize safsızlık saçılması ile sınırlandırılan mobilite, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu_{II} = \sqrt{\frac{128(k_B T)^3}{m^* \pi^3}} \frac{(4\pi\epsilon_S)^2}{Z^2 e^3 N_{imp} \left[\ln(1+\beta^2) - \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \right]} \quad (5.10)$$

Bu ifadede, m^* , etkin kütle; Z , iyonize atomun yükü, N_{imp} ise iyonize safsızlık yoğunluğudur. B ise aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\beta = \frac{2m^*}{h} \lambda_D \sqrt{\frac{2}{m^*} 3k_B T} \quad (5.11)$$

Bu ifadede λ_D , 3 boyutlu perdeleme uzunluğu olup aşağıdaki şekilde verilir.

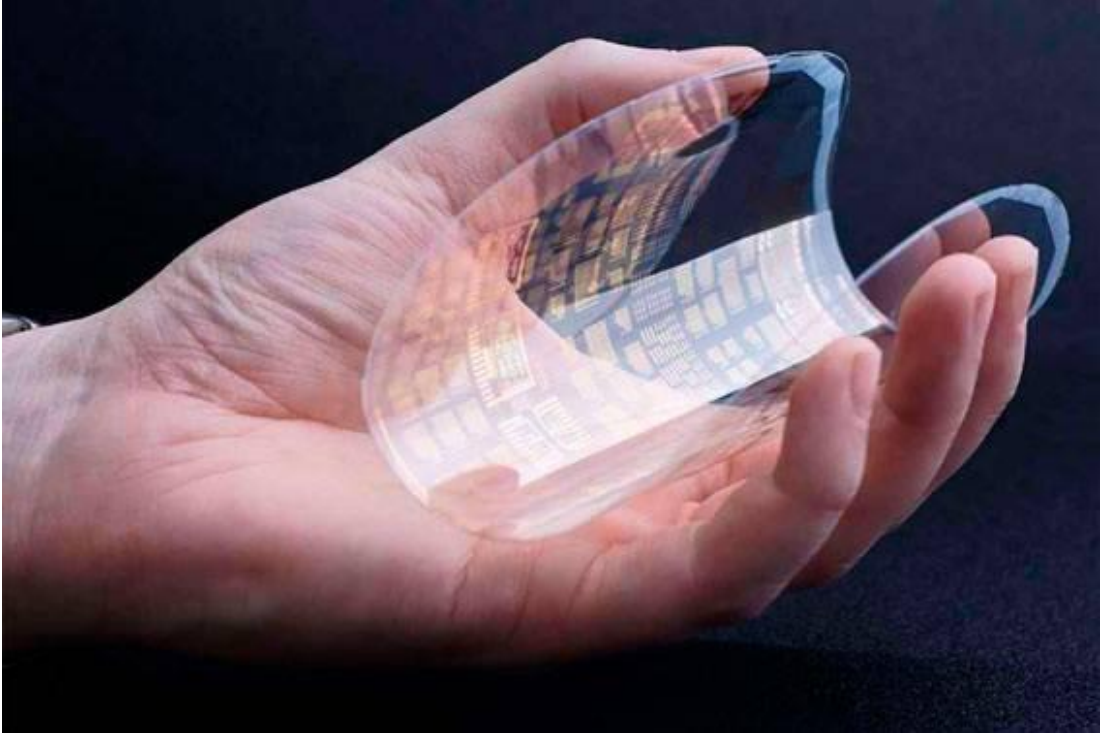
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T \epsilon_S}{e^2 n_{Bulk}}} \quad (5.12)$$

Burada ϵ_S , static dielektrik sabitidir.

Bu bölüm referans [14]'ten yararlanılarak düzenlenmiştir.

6. UYGULAMA ALANLARI

Yarıiletkenler, elektronik ve batarya enerji endüstrisi satışları ile çok yüksek rakamlara ulaşmıştır. Bu alanda grafene çok büyük rol düşmektedir. Grafen içinde yerel boşluklar oluşturularak çok çeşitli manyetik ve elektronik taşıyıcı sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Grafen çok sağlam bir maddedir, bu özelliğe elektrik tutucu bir madde olma özelliği de eklenince pil teknolojisine katkı sağlayabilir bir madde olarak göze çarpmaktadır. Grafen kullanılarak üretilen levhalar, ışık yayan organik ekran, katlanabilen kağıt kadar ince cep telefonları, gürültüsüz elektronik sensörler, sentetik kas, şeffaf iletken elektrotlar, güneş pilleri, grafen biyocihazlar, antibakteriyel ürünler, grafen nanoribonlar, grafen transistörler, grafen optiksel modülatörler, entegre devreler, basınç sensörleri ve rezonatörler gibi nanoelektromekanik sistem (NEMS) uygulamaları ve yüzeylerde desen oluşturma gibi birçok alanda grafen kullanılabilir.



Şekil 6.1: Grafen ile üretilen esnek ekran.

Grafenin kolaylık sağlayabileceği başka bir uygulama alanı ise süperkapasitörlerdir. Süper kapasitörler, sıradan kondansatörlerden çok daha fazla yük tutabilir. Grafenin özellikleri ile örtüşen süperkapasitörler elektronik cihazlarda yaşanan pil sıkıntısını ortadan kaldırılabilir. Yüksek mobilitesi ile çok hızlı şarj imkanı ve ısıya karşı dayanıklı olması sebebiyle elektronik cihazlardaki ısınma problemini ortadan kaldırma da grafenden beklenen özellikler arasındadır. Ayrıca hidrojenin verimli bir şekilde depolanıp elektrik enerjisi gereken yerlerde kullanılması için oldukça yoğun araştırmalar yürütölmektedir. Hidrojen depolamada grafen malzemesi oldukça önemli roller üstlenebilir

Grafenin sağlam bir malzeme olması savunma sanayisinde kullanılmasını mümkün kılabilir.

Ayrıca tuzu ve çeşitli partikülleri ayrıştırabilecek 1 nanometreden küçük delikli grafen elek ile tuzlu suyu içilebilir hale getirmek üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİ

Grafen başta yüksek elektriksel iletkenliği ve yüksek taşıyıcı mobilitesi ile elektronik cihazlarda bulunan yarıiletkenlerin yerini alacağına benzemektedir. Bu en başta saydığımız iki özellik daha birçok muazzam özelliğin habercisi niteliğindedir. Sağlamlığı, sıcaklık artışına karşı taşıyıcı mobilitesini silisyum gibi diğer yarıiletkenlere göre çok yüksek tutabilmesi elektronik teknolojilerinde çığır açması beklenen özelliklerdir. Grafen ile yapılacak taşıyıcı bellekler bilim kurgu filmlerindeki yüksek veri aktarım sahnelerine göz kırpmaktadır. Tüm bu özelliklerin ne derece kullanılabilir olacağına fabrikasyon aşaması karar verecektir. Düşük maliyet ile grafen bazlı elektronik cihazlar üretilebilirse bu gelişme teknolojik devrim niteliği taşıyacaktır.

Ülkemizde ve dünyada grafene yönelik akademik çalışmalar son dönemlerde oldukça ivme kazanmıştır. Bu ufuk açıcı malzeme için araştırma geliştirme komisyonlarımız olur da yüksek bütçeler ile çalışma ortamları hazırlanırsa ülkemiz bu teknolojik devrimin bir halkası olabilir.

Bu tez çalışması da bu konuya ilgi duyan bilim insanlarına faydalı olması açısından derleme bir çalışma niteliğindedir. Grafenin tarihçesi, yapısı ve genel özellikleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca hızlı ve verimli teknolojik cihazlarda transport önemli olduğu için kısaca saçılma mekanizmalarına da yer verilmiştir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Pietronero, L., Strassler, S., Zeller, H. R. and Rice, M. J., “Electrical conductivity of a graphite layer”, *Physical Review Letters*, B 22, 904–910, (1980).
- [2] Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan D., Miao, F., and Lau, C. N., “Extremely High Thermal Conductivity of Graphene: Experimental Study”, *Nano Letters*, 8, No:3, 902, (2008).
- [3] Yehong C., Shanbao Z., Ping H., Guangdong Z., Yongxia L., Xinghong Z. and Wenbo H., “Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction”, *Scientific Reports*, 7(1), 1439, (2017).
- [4] Arseven, M., “Nanokarbon ve Formları [online]”, (24.02.2019), <https://docplayer.biz.tr/3777298-Nanokarbon-ve-formlari.html>, (2010).
- [5] Katsnelson, M.I. and Novoselov, K.S., “Graphene: New bridge between condensed matter physics and quantum electrodynamics”, *Solid State Communications*, 143, 3–13, (2007).
- [6] <https://www.cheaptubes.com/graphene-synthesis-properties-and-applications>, (10.02.2019).
- [7] Javad, F., Dennis, A. and Gordon, G. W., “Effect of post-spinning on the electrical and electrochemical properties of wet spun graphene fibre”, *RSC Advances*, 6(52), 4627-6432, (2016).
- [8] Hwang, E. H., Adam, S. and Das Sarma, S., “Carrier Transport in Two-Dimensional Graphene Layers”, *Physical Review Letters*, 98, 186806, (2007).
- [9] Ferrari, A. C., “Raman spectrum of graphene and graphene layers”, *Physical Review Letters*, 97, 187401, (2006).
- [10] Balandina Alexander, A. and Nika Denis, L., “Phononics in Low-Dimensions: Engineering Phonons in Nanostructures and Graphene”, *Mesoscale and Nanoscale Physics*, 15 (6), 266, (2012).

- [11] Mattevi, C., Kim, H. and Chhowalla, M., “A review of chemical vapour deposition of graphene on copper”, *Journal of Material Chemistry*, 21(10), 3324-3334, (2011).
- [12] Obraztsov, A. N., “Chemical Vapour Deposition making graphene on a large scale”, *Nat Nanotechnol*, 4(4), 212-213, (2009).
- [13] Ağızaçmak, S., Tülek, R., Gökden, S., Teke, A., Arslan, E., Aygar, A. M. and Özbay, E., “Transport properties of epitaxial graphene grown on SiC substrate”, *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 11, 3-4, 197 – 201, (2017).