

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



**EPİTAKSİYEL GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SELMAN AĞIZAÇMAK**

**BALIKESİR, OCAK - 2019**

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



**EPİTAKSİYEL GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SELMAN AĞIZAÇMAK**

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

**Prof. Dr. Ali TEKE**

**Prof. Dr. Orhan GÜRLER**

**BALIKESİR, OCAK - 2019**


## KABUL VE ONAY SAYFASI

**SELMAN AĞIZAÇMAK** tarafından hazırlanan “**EPİTAKSİYEL GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.01.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği 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. Ali TEKE



.....

Üye  
Prof. Dr. Orhan GÜRLER



.....

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

**EPİTAKSİYEL GRAFENDE SAÇILMA MEKANİZMALARI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
SELMAN AĞIZAÇMAK  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)**

**BALIKESİR, OCAK - 2019**

Bu çalışmada, SiC alt taş üzerine büyütülen grafenin sıcaklığa bağlı (12-300K) Hall etkisi ölçümleri gerçekleştirildi. Bu Hall verilerine ilk olarak, Basit Paralel İletim Ayırıştırma Yöntemi (SPCEM) uygulanarak, 3 boyutlu (3B) ve iki boyutlu (2B) kanalların sıcaklık bağımlı mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları elde edildi. Oda sıcaklığında grafen tabakasından  $2296 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  yüksek taşıyıcı mobilitesi ve SiC'den  $813 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  düşük taşıyıcı mobilitesi elde edildi. SPCEM verileri kullanılarak, 3B ve 2B saçılma mekanizmaları analiz edilerek, düşük ve yüksek sıcaklıklarda baskın saçılma mekanizmaları belirlendi. İletim işleminin esas olarak 2B grafendeki saçılma mekanizmaları ile belirlendiği ortaya konuldu.

**ANAHTAR KELİMELEER:** 2B grafen, İletim, Mobilite, Hall etkisi, Basit paralel iletim ayırıştırma yöntemi (SPCEM), Saçılma mekanizmaları.

## **ABSTRACT**

### **EPITAXIAL GRAPHENE SCATTERING MECHANISMS**

**MSC THESIS**

**SELMAN AĞIZAÇMAK**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**PHYSICS**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. SİBEL GÖKDEN)**

**BALIKESİR, JANUARY 2019**

In this thesis, the Hall effect measurement of graphene on SiC substrate was carried out as a function of temperature (12-300 K). Hall data were first analyzed to extract the temperature dependent mobilities and carrier densities of the bulk (3B) and two dimensional (2B) channels using a Simple Parallel Conduction Extraction Method (SPCEM) successfully. High carrier mobility  $2296 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  from the graphene layer and low carrier mobility  $813 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  from the SiC were obtained at room temperature. By using SPCEM extracted data, 3B and 2B scattering mechanisms were analyzed and the dominant scattering mechanisms in low and high temperature regimes were determined. It was found that the transport was mainly determined by scattering processes in 2B graphene.

**KEYWORDS:** 2B graphene, Transport, Mobility, Hall effect, Simple parallel conduction extraction method (SPCEM), Scattering mechanisms.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	vi
KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL BİLGİLER.....</b>	<b>3</b>
2.1 Grafenin Tarihçesi .....	3
2.2 Grafenin Yapısı .....	4
2.3 Grafenin Özellikleri.....	6
2.3.1 Fiziksel Özellikleri.....	7
2.3.2 Kimyasal Özellikleri .....	8
2.3.3 Elektriksel Özellikler .....	8
2.3.4 Optik Özellikleri .....	10
2.3.5 Mekanik Özellikleri .....	10
2.3.6 Termal Özellikleri.....	10
2.4 Grafenin Sentezlenmesi.....	11
2.4.1 Kaydırma Yöntemi .....	11
2.4.2 Epitaksiyel Büyütme.....	11
2.4.3 Silisyum-Karbon Yöntemi.....	12
2.4.4 Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi.....	12
2.5 Uygulama Alanları .....	13
2.5.1 Biyomedikal.....	13
2.5.2 Entegre Devreler .....	13
2.5.3 Optoelektronik .....	13
2.5.4 Güneş Hücreleri .....	14
2.5.5 Enerji Depolama Aygıtları.....	14
2.5.6 Antibakteriyel .....	15
2.5.7 Diğer Uygulamalar .....	15
<b>3. DENEYSEL BİLGİLER.....</b>	<b>16</b>
<b>4. TEORİ.....</b>	<b>17</b>
4.1 Basit Paralel İletim Ayrıştırma Yöntemi (SPCEM) .....	17
4.2 2-Boyutlu (2B) ve 3-Boyutlu (3B) Taşıyıcıların Saçılma Mekanizmaları.....	18
4.2.1 2B Taşıyıcılarda Saçılma Mekanizmaları.....	18
4.2.1.1 Boyuna Akustik Fonon (LA) Saçılması.....	19
4.2.1.2 Uzaklaştırılmış Ara-Yüzey Fonon (RIP) Saçılması.....	19
4.2.1.3 Sıcaklıktan Bağımsız Saçılma.....	19
4.2.2 3 Boyutlu (3B) Taşıyıcılarda Kullanılan Saçılma Mekanizmaları .....	20
4.2.2.1 Akustik Fonon Saçılması .....	21
4.2.2.2 Polar Optik Fonon Saçılması .....	22
4.2.2.3 İyonize Safsızlık Saçılması .....	23

<b>5. BULGULAR .....</b>	<b>24</b>
<b>6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>28</b>
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>29</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 2.1:</b> Karbon atomunun farklı yapıları. ....	5
<b>Şekil 2.2:</b> Grafen ve grafitte ait atomik yapıların düzenlenmesi ve $sp^2$ hibritleşmesi.....	6
<b>Şekil 2.3:</b> Yarıiletken ve grafenin bant yapılarının karşılaştırılması .....	9
<b>Şekil 2.4:</b> Epitaksiyel büyütme tekniğinde kullanılan cihaz.....	12
<b>Şekil 2.5:</b> Grafen'in OLED'e katkısı .....	14
<b>Şekil 5.1:</b> SiC alt taş üzerinde büyütülen grafenin sıcaklığa bağlı mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu değerleri. ....	24
<b>Şekil 5.2:</b> Hall mobilitesi ve SPCEM'den çıkarılan 2B ve bulk taşıyıcıların sıcaklığa bağlı mobiliteleri. ....	25
<b>Şekil 5.3:</b> Hall ölçümünün taşıyıcı yoğunluğu ve SPCEM'den çıkarılan 2B ve bulk taşıyıcıların taşıyıcı yoğunluğu. ....	26
<b>Şekil 5.4:</b> SPCEM analizinden elde edilen 2B grafen tabakaya ait saçılma mekanizmaları ile ilişkili hall mobiliteleri. ....	27
<b>Şekil 5.5:</b> SPCEM analizinden elde edilen 3B SiC alt taşta ait saçılma mekanizmaları ile ilişkili hall mobiliteleri. ....	27



## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 4.1:</b> 2B saçılma mekanizmalarının analizinde kullanılan grafene ait parametreler.....	20
<b>Tablo 4.2:</b> 3B saçılma mekanizmasında kullanılan SiC'e ait parametreler. ....	21

## KISALTMA VE SEMBOL LİSTESİ

$k_b$	: Boltzmann sabiti
$m^*$	: Etkin kütle
$e$	: Elektronun yükü
$\epsilon_s$	: Yarıiletkenin statik dielektrik sabiti
$\epsilon_0$	: Boşluğun dielektrik sabiti
$\hbar$	: İndirgenmiş planck sabiti
$N_{IMP}$	: İyonize safsızlık yoğunluğu
$\hbar\omega_{PO}$	: Polar optik fonon enerjisi
$C_{LA}$	: Elastik sabiti
$k$	: Elektron dalga vektörü
$K$	: Elektromekanik çiftlenim katsayısı
$E_D$	: Deformasyon potansiyel sabiti
$\rho_s$	: 2 boyutlu grafenin kütle yoğunluğu
$v_s$	: Boyuna akustik fonon hızı
$v_f$	: Grafenin fermi hızı
$D_A$	: Grafene bağlı deformasyon potansiyeli
$E_1$	: Fonon enerjisi
$E_2$	: Fonon enerjisi
$C_1$	: Çiftlenim gücü parametresi
$C_2$	: Çiftlenim gücü parametresi
$\mu_0$	: Sıcaklıktan bağımsız mobilite
$\tau_m$	: Momentum durulma zamanı
<b>SPCEM</b>	: Paralel iletim ayrıştırma yöntemi
<b>2B</b>	: İki boyutlu

<b>3B</b>	: Üç boyutlu (Bulk)
<b><math>\mu_{2B}</math></b>	: 2B (2 boyutlu) taşıyıcı mobilitesi
<b><math>\mu_{Bulk}</math></b>	: 3B (3 boyutlu) taşıyıcı mobilitesi
<b><math>\mu_H</math></b>	: Hall mobilitesi
<b><math>n_{2B}</math></b>	: 2B taşıyıcı yoğunluğu
<b><math>n_{Bulk}</math></b>	: 3B taşıyıcı yoğunluğu
<b><math>\mu_{LA}</math></b>	: Boyuna akustik fonon saçılmasından kaynaklı mobilite
<b><math>\mu_{RIP}</math></b>	: Uzaklaştırılmış ara-yüzey fonon saçılmasından kaynaklı mobilite
<b><math>\mu_0</math></b>	: Sıcaklıktan bağımsız mobilite
<b><math>\mu_c</math></b>	: Coulomb saçılmasından kaynaklı mobilite
<b><math>\mu_{SR}</math></b>	: Kısa menzilli saçılmadan kaynaklı mobilite

## ÖNSÖZ

Çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Sibel GÖKDEN ve Doç. Dr. Remziye TÜLEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her zaman maddi ve manevi yanımda olan aileme ve beni destekleyen eşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

# 1. GİRİŞ

Grafen temelli sistemler, Novoselov ve arkadaşlarının [1-4] yaptığı çalışmanın ardından alışılmadık elektrik özelliklerinden dolayı oldukça ilgi çekmeye başlamıştır. Enerji bant boşluğu olmayan bir yapıya sahip olan ve bir alt taş yardımı ile yarıiletken özelliği gösteren grafen, bal peteği örgüsünde atomların iki boyutlu dizilmiş halidir [1] ve sıkı paketlenmiş karbon atomları ve  $sp^2$  hibritleşmesinden dolayı kimyasal ve mekanik olarak kararlıdır. Grafen atomik kalınlıkta yüksek elektron mobilitesine (hareketlilik, devingenlik) sahip olup geniş uygulama alanları vardır [5-9]. Serbest duran wafer (free standing wafer) [2] için grafenin mobilitesi  $200.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'nin üzerinde değerlere ulaşmakla beraber, farklı alt taş üzerinde büyüyen grafen tabakalarda önemli bir düşüş gösterir. SiC'de büyüyen tek tabakalı grafenin mobilitesinin  $45-50.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  aralığında olduğu gözlenmiştir [10-12]. Benzer şekilde, farklı alt taş ( $\text{SiO}_2$ , Ni, Ru, Ir, Cu) üzerinde büyütülen veya aktarılan grafen tabakası, daha düşük veya daha yüksek mobiliteler ortaya koymuştur. Bu nedenle, alt taş üzerinde büyütülen 2B grafende, mobiliteleri sınırlandırıcı mekanizmanın araştırılması önemlidir.

Taşıyıcıların bir yarıiletken sistemdeki hareketliliğini ve taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek, yapıyı başarılı bir şekilde karakterize etmek için büyük önem taşımaktadır. 2 boyutlu (2B) yarıiletken sistemlerde, iletimin geneli, farklı elektrik taşınım özelliklerine sahip, hem 2B kanaldaki hem de bulk (3B) bölgesi içerisinde mevcut olan yük taşıyıcıları tarafından sağlanabilir. Literatürde, bir 2B kanallı taşınım parametrelerini, bulk olandan ayırmakla ilgili bir çok ayrıştırma yöntemi sunulmuştur [13-18]. Bunlar arasında, böyle her iki türden taşıyıcı içeren yüksek elektron mobiliteli transistör ya da modülasyon katkılı bir alan etkili transistör gibi yapılar için Lisesivdin ve arkadaşları [19] tarafından sunulan Basit Paralel İletim Ayrıştırma Yöntemi (SPCEM), en basit ve en etkili yöntemdir. AlGaN / GaN [19, 20], AlInN / GaN hetero-yapılar [21] ve grafen / SiC [22, 23] gibi çeşitli materyal sistemlerinde bulunan çoklu kanalların mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunluklarının çıkarılması işlemleri, bu basit yaklaşım kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu alışmada, 0.5 T'lik dūřuk manyetik alanda sıcaklığa bağlı alınan Hall verilerine SPCEM analizi uygulanarak, dūřuk sıcaklıklarda ve yūksek manyetik alanlarda ōzdirenteki salınımların olası etkilerini ortadan kaldırmak mūmkūn olmuştur. 2B grafen ve bulk SiC alt taşın ōlūlen sıcaklık bağımlı Hall mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları ōnce SPCEM analizini kullanarak çıkarıldı ve ardından, her iki kanaldaki taşıyıcıların mobiliteleri, 12-300 K sıcaklık aralığında taşınım ōzelliklerini yōneten ana saçılma mekanizmaları kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

Bu bölümde grafenin tarihçesi, yapısı, özellikleri, grafenin sentezlenmesi ve uygulama alanları ele alınmıştır.

### 2.1 Grafenin Tarihçesi

Altıgen petek örgü biçiminde birbirine bağlanan, grafitten ayrılmış karbon atomlarının tek katmanına grafen adı verilir. Tarihsel açıdan bakıldığında, grafen kelimesi Yunancada ‘yazmak’ anlamına gelen graphein kelimesinden türemiştir. Bu grafenin ilk kullanımlarından biri olmuştur. 1800 yılında, Alman kimyager Wagner, grafit kelimesini kalemlerin gövde malzemesi için kullanmıştır. Ancak o dönemde, grafitin bir çeşit kurşun (Pb) olduğu düşünüldüğünden, grafit kalemler hatalı bir biçimde kurşun kalem olarak adlandırılmıştı.

İlk olarak 1840 yılında Alman bilim adamı Schafhaeutl, araya ekleme (asit veya alkali metal gibi küçük molekülü maddeleri karbon levhalar arasına yerleştirme) ve soyma (sülfürik ve nitrik asit ile) yoluyla, tekil grafit yapraklarını ayırtmıştır. Bu yapraklar, daha sonra serbest duran (free standing) grafen ile ortaya konulan olağanüstü elektrik özellikleri ortaya koymuştur.

1859 yılında B. C. Brodie, yeni karbon biçimi “grafon”un keşfini ilan etti. Bunu, grafiti araya ekleyerek elde etti ve adını karbonik asit koydu. Grafit, güçlü sülfürik ve nitrik aside maruz kaldığında grafit araya girer ve grafit oksit (GO) ortaya çıkar. 1962 yılında Boehm ve arkadaşları, GO’nun kimyasal indirgemesinin ardından ince katmanlı karbon ürettiler. Bu süreçte indirgeyici faktör olarak, hidrazinli, seyreltik alkali ortamları, hidrojen sülfid ya da demir tuzları kullanıldı.

Grafenin sentezi geç elde edilmiş olsa da elektronik özelliklerinin araştırılıp incelenmesi 1946’lara kadar dayanmaktadır. P. R. Wallace grafen sözcüğü yerine ‘‘tek katmanlı yapı’’ diye isimlendirdiği çalışmasında grafenin enerji bant yapısını inceleyip 3 boyutlu grafitin elektronik niteliklerini anlamaya çalışmakta kullanmıştır.

Grafenin içinde bulunan yük taşıyıcıları incelendiğinde kütlelerinin yok gibi davrandıkları gözlemlenmiştir.

1962'de Boehm, grafit oksit tek tabakalarının hidrazin kullanarak grafene indirgenebileceğini fark etmiştir [25]. Yüzey ölçümlerinin bir kombinasyonu kullanılarak bu grafen katmanlarının kalınlıklarını ölçmeyi başardı. Böylece Boehm serbestçe asılı grafen pullarını üreten ve ölçen ilk kişi olmuştur [25].

1975 yılında Van Bommel ve arkadaşları, yüksek sıcaklıkta yüksek vakum ( $<10^{-10}$  Torr) altında silikon karbür (SiC (0001)) kristalinden silikon atomlarını süblimleştirerek ince grafen levhaları elde ettiler. 1999 yılında mikro-mekanik bir yaklaşımla tek-katmanlı grafen yapraklarını oluşturulmasına çalışıldıysa da, bu girişim başarılı olmadı.

2004 yılında 17 atom kalınlığında saf grafen tabakası Manchester Üniversitesi profesörlerinden Prof. Dr. Andre K. Geim ve Prof. Dr. Konstantin Novoselov tarafından izole edildi. Bu izole çalışması, ikili grafit parçasından ufak bir parça kaldırmak için bant kullanılarak oldukça basit bir metotla grafenin varlığına dair süre gelen tartışmaya son vermiş oldu. Çağın gelişmesi ile grafenin sentezi bu yöntemin dışında pek çok şekilde gerçekleştirilmektedir. Grafenin daha çok ticari alan için üretimi ile ilgili araştırmalar son günlerde var olan araştırmaların en önemlileri arasındadır. Böylece Geim ve Novoselov, 2010 yılında grafeni tek tabaka halinde sentezlemeyi başarmış ve grafenin beklenenden çok daha değişik elektronik ve fiziksel özelliklere sahip olduğunu ispatlayarak, bilgisayar işlemcilerini inanılmaz hızlara çıkarma potansiyeli olan grafenle ilgili çalışmalarını nedeniyle fizik alanında Nobel Ödülü aldılar ve hatta 2010 yılı “grafen yılı” olarak tarihe geçmiştir.

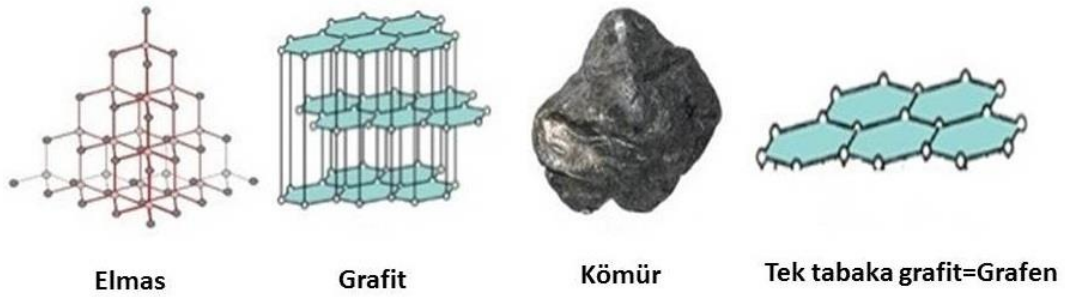
Bu kısım hazırlanırken [24] nolu referanstan faydalanılmıştır.

## **2.2 Grafenin Yapısı**

1980'e kadar karbon atomunun, dizilişlerine göre sadece 3 temel formu olduğu sanılıyordu. Bunlar elmas, grafit, amorf karbon (kömür). Aynı grafit ve elmas olduğu gibi grafen de bir karbon allotropudur. Kurşun kalemlerde kullanılan grafit yarıiletken olup, çok yumuşak ve kırılabilir bir yapıya sahipken, elmas yalıtkan



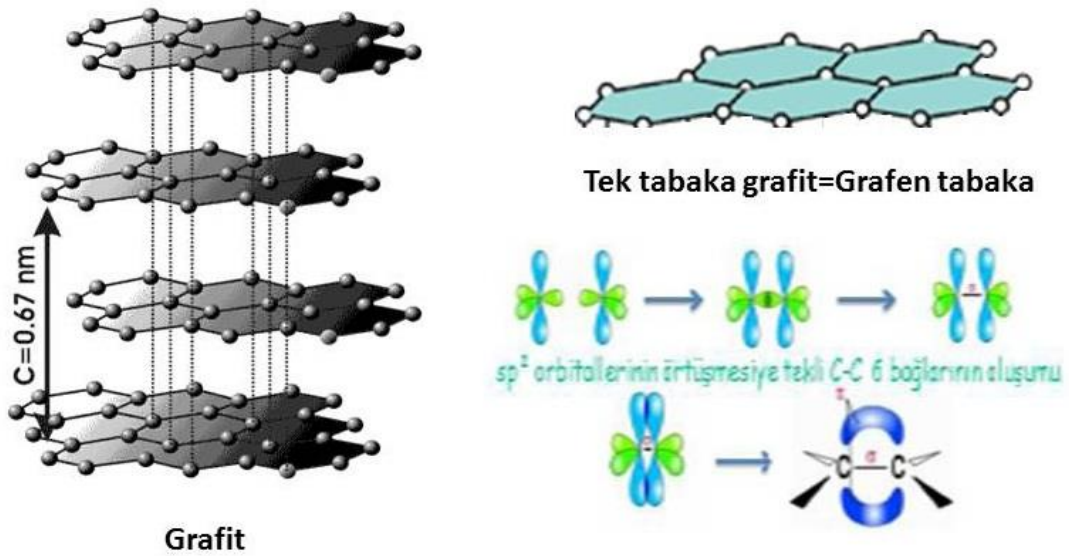
olup, dünyanın en sert ve dayanıklı malzemelerinden biridir. Grafen de karbon bazlı ve bilinen ilk 2 boyutlu malzemedir. Grafenlerin bir araya gelmesiyle grafitler elde edilir (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1:** Karbon atomunun farklı yapıları.

Karbonun bal peteği örgülü yapıları olan grafen, grafit, karbon nanotüp ve fulleren  $sp^2$  melezleşmesinin ürünüken, elmas ise  $sp^3$  melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile öncekilerden farklı bir kategoride değerlendirilir (Şekil.2.2). Grafitte her bir karbon atomu aynı düzlemde bulunan diğer üç atoma altıgen halkalar oluşturacak şekilde bağlanır. Oluşan ağ iki boyutludur ve bu şekilde meydana gelen tabakalar birbirine zayıf Van der Waals kuvveti ile bağlanır. Grafen de tek tabakalı grafit olarak bilinir. Karbon atomları 2s ve 2p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı  $sp^2$  melezleşmesi yaparken melezleşme sırasında aktif rol alan  $p_z$  orbitalleri grafen malzemesine alışlagelmedik özellikler kazandırmaktadır. Grafen yapısında karbon ile karbon bağ arası mesafe 1.42 Angstrom olarak hesaplanırken, iki grafenin üst üste gelmesi ile meydana gelen grafitteki mesafe 3.35 Angstrom civarındadır. Grafenin güçlü karbon bağları sayesinde grafen yeryüzünde bulunan en sağlam malzemelerin yanında yer almaktadır. Grafen güçlü bir malzeme olmasına rağmen grafitteki grafen katmanlar arasındaki bağ kuvvetli değildir. Elmas ve grafit doğada serbest olarak bulunurken karbon nanotüpler, C60 molekülleri ancak doğal olmayan yollarla sentezlenebilmektedir. Karbonun grafit fazının elmastan bile kararlı bir yapıya sahip olduğu, termodinamiksel hesaplamalara göre hesaplanmıştır. Eldeki bu bilgilere rağmen grafen malzemesinin yani grafitin tek katmanlı halinin sentezlenmesi 2004

yılına kadar başarılammıştır. L. D. Landau ve R. Peierls gibi önemli fizikçiler grafen ve grafene benzer iki boyuta sahip malzemelerin teorikte kararlı olmayacağını, sıcaklığın düşük olduğu ortamlarda bile malzemenin dağılabileceğini ön görmüşlerdir. Grafenin yüzeyine dik termal dalgalanmalar olduğunda grafenin daha çok kararlı olduğunun kanaatindedirler.



Şekil 2.2: Grafen ve grafitte ait atomik yapıların düzenlenmesi ve  $sp^2$  hibritleşmesi.

### 2.3 Grafenin Özellikleri

Grafen oldukça ilgi çekici bir maddedir. Büyük bir kuramsal spesifik yüzey alanına ( $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ), yüksek yapısal mobiliteye ( $200\,000 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), yüksek Young modülüne ( $\sim 1.0 \text{ TPa}$ ), iyi bir termal geçirgenliğe ( $\sim 5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ve optiksel geçirgenliğe ( $\sim 97.7\%$ ) sahiptir [26].

Grafen  $0.42 \text{ nm}$  kalınlığında ve çelikten 100 kat daha güçlüdür. Bu durum oldukça dikkat çekicidir. Grafenin elektron iletim özelliği kendine özgüdür. Bu farklılık elektrik akımının ışık hızına yakın olan hızla akmasına müsaade eden yüksek bir taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesinin olmasıdır. Bu durumda daha hızlı işlem sağlayan bilgisayarlar ve performansı daha yüksek elektronik cihazlar elde

edilebilir. Columbia Nanoteknoloji merkezi araştırmacıları, elektronların fotonlara benzer relativistik madde parçalarının iletilmesini oda sıcaklığında çok dūřuk etkin kütleleri ile grafen boyunca taşınabileceği keşfetti. Bu sebepten ötürü grafen pek çok malzemeye göre daha iyi elektriksel özellik göstermektedir. Bu kısım [27] nolu referanstan faydalanarak hazırlanmıştır.

Aşağıda grafene ait özellikler zet bir şekilde sunulmuştur.

### 2.3.1 Fiziksel zellikleri

- Keşfedilen ilk 2 boyutlu kristaldir.
- Düzenli kristalik yapı gösterir.
- Dalgalı yapı gösterir. 2 boyutta düzlemsel bir şekilde durabilmesi için destek bir alt tabakaya ihtiyaç duyar.
- Bükülebilir bir maddedir. Grafen tabakası küresel halde yuvarlandığında sıfır boyutlu yapı fulleren, silindirik şekli verildiğinde tek boyutlu karbon nanotüp, grafen tabakalarının st üste dizilmesiyle de 3-boyutlu grafit oluşur.
- Yüksek geçirgenliğe sahip grafen tek bir tabaka beyaz ışığın sadece %2.3 n absorplar.
- Yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir ( $15000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ).
- Yüksek termal iletkenliğe sahiptir ( $5000 \text{ W/MK}$ ).
- Yüksek gerilme direncine sahiptir.
- Yüksek sıcaklık direncine sahiptir ( $-75$  ile  $200^\circ\text{C}$  arasında grafenin özelliklerinde bir değişiklik gözlenmiyor.).
- Grafen transistörler dşuk direnci nedeni ile soğutulma ihtiyaç duymaz.

### 2.3.2 Kimyasal Özellikleri

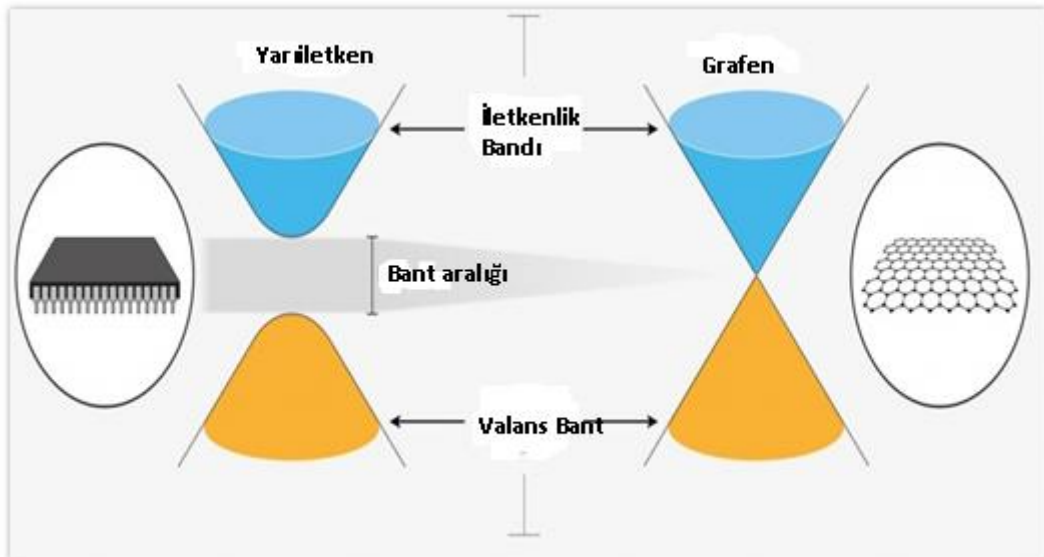
- Kimyasal olarak çok reaktif değildir.
- Grafen yapısına göre karbon ile karbon bağ arasındaki uzaklık yaklaşık 1.42 Angstrom olarak hesaplanmıştır.
- Bir çift bir tek bağ olacak şekilde konjuge sistemlidir.
- Grafende bulunan karbon atomları arasındaki sigma ve pi diye adlandırılan bağlar ona sağlamlık katmıştır. Bu sağlamlığa rağmen grafitin katmanları arası çekim kuvveti güçlü değildir.
- Kurşun kalem kağıt ile birleşince güçsüz çekim kuvvetleri yenilerek grafen tabakalarının kağıtta kalması sağlanır. Bu grafen tabakaları yazıdaki izleri oluşturmaktadır.
- Normalde karbon atomları 4 elektrona sahip iken, iki boyutlu olan grafende üç atom ile bağ elde edildiğinden 4. elektron, kristalde serbest dolaşmasından dolayı grafenin iletkenliğini yükseltmektedir.
- Grafenin kristal yapısı Bravais örgü değildir. Daha çok birim hücresinde 2 karbon atomu bulunduran üçgensel örgü kullanılarak ifade edilebilir.
- Karbon atomları 2s ve 2p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı  $sp^2$  melezleşmesi yaparken  $p_z$  orbitalleri boşta kalır.

### 2.3.3 Elektriksel Özellikler

Grafen ile ilgili yapılan bir çok deneysel araştırma grafenin elektronik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

- Grafenin kendine özgü bir özelliği de normal şartlar altındaki sıcaklıkta elektronların herhangi bir çarpışma olmadan uzun mesafe kat edebilme özelliğine sahip bir malzeme olmasıdır. Bu nedenle de grafenin elektrik iletkenliği oldukça yüksektir.
- Grafende yapısı gereği bant aralığı yoktur (Şekil 2.3).

- 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.
- Düşük sıcaklık ve yüksek manyetik alanlarda grafen elektronlarının olağanüstü hareketliliği sayesinde kuantum Hall etkisi hem elektronlar hem de holler için gözlemlenir.
- Grafende bulunan elektronların kütleleri sıfır sayılabilecek kadar küçüktür. Bu sebepten dolayı grafen elektronlar kütesiz Dirac fermiyonları diye de anılmaktadır.
- Hall etkisi ölçüm tekniği ile taşıyıcıların mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları belirlenir.
- Grafende elektrik akımının ışık hızına yakın olan hızla akmasına müsaade eden yüksek bir taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi vardır.
- Yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir ( $15000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ).



**Şekil 2.3:** Yarıiletken ve grafenin bant yapılarının karşılaştırılması [28, 29].

### 2.3.4 Optik Özellikleri

- Beyaz ışığın %2.3'ünü absorbe eder. Bu özellik grafenin bal peteği şeklindeki kristal yapısından kaynaklanmaktadır.
- Saydamdır.

### 2.3.5 Mekanik Özellikleri

- Grafen şimdiye dek test edilen en güçlü materyallerden biridir.
- Çelikten 100 kat daha dayanıklıdır.
- Grafenin endüstride ekonomik olarak kullanılması için, doğal yollarla gerçekleşen grafitten elde etmeye yönelik bazı teknolojik gelişmeler gerekir.
- Grafen, basınç sensörleri ve rezonatörler gibi nanoelektromekanik sistem (NEMS) uygulamalarında kullanılabilir.
- Grafenin mekanik özelliklerinin, yeni nesil süper güçlü kompozit materyallerin oluşturulmasına ve optik özellikleriyle birlikte esnek ekranlar üretmeye yönelik uygulamalar bulması bekleniyor.

### 2.3.6 Termal Özellikleri

- Oda sıcaklığında grafenin termal iletkenlik katsayısı  $(4.84 \pm 0.44) \times 10^3$  ile  $(5.30 \pm 0.48) \times 10^3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  arasında ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçları, oda sıcaklığında karbon nanotüpler veya elmas için ölçülen ölçüm sonuçlarından daha yüksektir.
- 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.

## 2.4 Grafenin Sentezlenmesi

2004 yılında Andre Geim, Kostya Novoselov ile proje arkadaşları tarafından basit bir selobant grafit üzerine defalarca yapıştirılıp kaldırılarak çift olmayan bir grafen katmanı ayrımı başarıldı ve optik mikroskop ile gözlemlendi. Bu yapılanlar ilk etapta kimse tarafından pek önemsenmedi fakat daha sonraları grafende keşfedilen herhangi bir kütleyle sahip olmayan Dirac fermiyonları, anormal kuantum hall etkisi, normal sıcaklıktaki balistik taşınma, Klein paradoksu ve buna benzer yeni veriler deneysel olarak gözlemlendi. Böylece grafene ilgide bir artış meydana gelmeye başladı. Grafen genel olarak şu yöntemler ile elde edilmektedir:

- Kaydırma yöntemi
- Epitaksiyel Büyütme
- Silisyum-Karbon yöntemi
- Kimyasal ayrıştırma yöntemi

Aşağıda bir kaç cümle ile büyütme tekniklerinden bahsedilmiştir.

### 2.4.1 Kaydırma Yöntemi

Grafit tabakası bir yüzey üzerinde kaydırılarak grafiti oluşturan grafen katmanlarının birbirinden ayrılması sağlanır. Selobant ile gerçekleştirilen ayrıştırma yöntemi de bu metot içinde değerlendirilir. Manchester grubu tarafından yapılan ilk grafen sentezlenmesi de bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 100 mikrometre büyüklüğünde grafen parçaları bu yol ile sentezlenebilmektedir.

### 2.4.2 Epitaksiyel Büyütme

Grafenin bir alt taş üzerinde büyütülmesi olup grafenin büyütüldüğü alt taş grafen ile etkileşime girmektedir. Alt taş olarak SiC, SiO<sub>2</sub>, Ni, Ru, Ir, Cu kullanılır. Son derece gelişmiş büyütme teknikleri kullanılır (Şekil 2.4).



**Şekil 2.4:** Epitaksiyel büyüme tekniğinde kullanılan cihaz.

### **2.4.3 Silisyum-Karbon Yöntemi**

Silisyum karbürün 1100 dereceye yaklaşan bir ısıya kadar ısınması ve silisyum atomlarının buharlaşması sonucu kalan karbon atomlarının grafen oluşturma yöntemidir. Oluşan parçacıklar diğer yöntemler ile elde edilen grafen parçalarına göre daha ufaktır.

### **2.4.4 Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi**

Grafit tabakalarının arasına sitrik asit ve buna benzer kimyasalların karıştırılması ile de grafen tabakalarının birbirinden ayrıştırılması sağlanmaktadır.



## 2.5 Uygulama Alanları

2014 yılı itibariyle grafen ticari uygulamalarda kullanılmamakla birlikte, elektronik, biyomedikal mühendislik, filtreleme, hafif / kuvvetli kompozit malzemeler, fotovoltaik ve enerji depolaması gibi alanlarda kullanılabileceği önerilmekte ve bunun doğrultusunda çalışmalar geliştirilmektedir. Aşağıda başlıca uygulama alanları özetlenmiştir.

### 2.5.1 Biyomedikal

Grafen yakında DNA'yı rekor bir hızla analiz etmek için kullanılabilir. ABD'de bir fizikçinin, bir molekülü bir grafen tabakasındaki küçük bir yarıktan geçirerek, DNA zincirindeki kimyasal temeli çözmenin yolunu önermiştir [29].

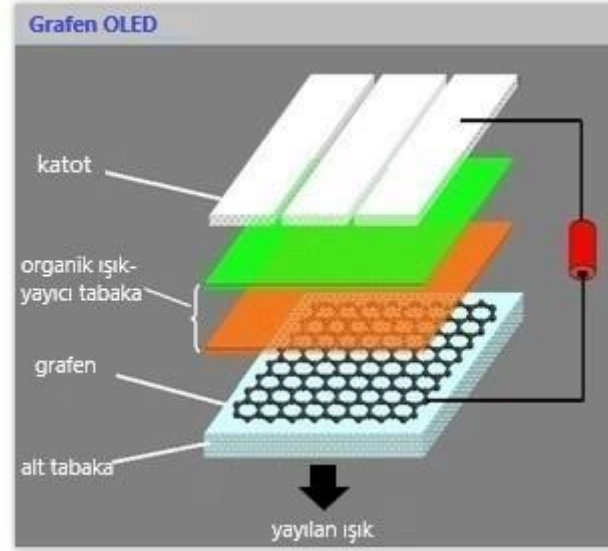
### 2.5.2 Entegre Devreler

- Grafenin yüksek bir taşıyıcı hareketliliği ve düşük gürültülü özelliği sayesinde bir alan etkili transistörde kanal olarak kullanılmasına olanak tanır.
- 2-inç (51 mm) grafen levhalar üzerinde 100 GHz transistör kullanan işlemcileri mümkün kılar.
- Grafen tabanlı entegre devreler 10 GHz'e kadar olan frekansları işlemektedir.
- Esnek plastik üzerine 25 GHz'de çalışan transistörler ve
- Terahertz mertebesinde hızlı transistörleri mümkün kılmaktadır.

### 2.5.3 Optoelektronik

- Grafenin yüksek elektriksel iletkenliği ve yüksek optik saydamlığı, şeffaf iletken elektrotlar için bir aday olmasını sağlar.
- Grafen'in mekanik dayanıklılığı ve esnekliği, kırılğan olan indiyum kalay oksit ile karşılaştırıldığında avantajlıdır.

- Bu nedenle, optoelektronik uygulamalarda çok iyi çalışacaktır: dokunmatik ekranlar, sıvı kristal ekranlar, organik fotovoltaik hücreler ve organik ışık yayan diyotlar (OLED). Şekil 2.5’de grafen OLED’in yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5: Grafen’in OLED’e katkısı [29].

#### 2.5.4 Güneş Hücreleri

- Grafen, boya duyarlılaştırılmış güneş pillerinde foto-elektrokimyasal enerji dönüşümü için umut verici bir malzeme haline gelmiştir.
- Grafen filmleri, şeffaf, iletken ve ultra pul dökülmüş grafit oksitten imal edilir ve bunu termal indirgeme izler.
- Elde edilen filmler, 550 S / cm'lik yüksek bir iletkenlik ve 1000-3000 nm'de % 70'in üzerinde bir şeffaflık sergiler.

#### 2.5.5 Enerji Depolama Aygıtları

- Grafenin son derece yüksek yüzey alanı / kütle oranı nedeniyle, süper kapasitörlerin iletken plakalarında bir potansiyel uygulama bulunmaktadır.
- Günümüzde mevcut olanlardan daha büyük bir enerji depolama yoğunluğuna sahip olan süper kapasitörler üretmek için grafenin kullanılabileceği düşünülmektedir

### **2.5.6 Antibakteriyel**

- Çin Bilim Akademisi, 2010 yılında, grafen oksit tabakalarının Escherichia coli gibi bakterileri öldürmede oldukça etkili olduğunu keşfetti.
- Bu, grafenin hijyen ürünleri veya ambalaj gibi daha uzun süre taze tutmasına yardımcı olacak uygulamalarda yararlı olabileceği anlamına gelir.

### **2.5.7 Diğer Uygulamalar**

Başlıca diğer uygulama alanları grafen nanoribonlar, IR detektörler, tek moleküllü gaz algılama cihazları, piezoelektrik malzeme üretimi, kompozit malzemeler, termal yönetim malzemeleri, optik modülatörler ve kimyasal sensörlerdir.

### 3. DENEYSEL BİLGİLER

Bu tezde ilk olarak kimyasal-mekanik cilalı 4H-SiC alt taş üzerine (0001) doğrultulu Si-yüzlü olarak, (10x10) mm<sup>2</sup> boyutlarında büyütülen epitaksiyel grafende Hall ölçümleri alındı. Tek katmanlı grafen olduğu, uyarı kaynağı olarak 532 nm (2.33 eV) He-Ne lazer kullanılarak, standart Raman ölçümleriyle doğrulandı. Numuneler, en az 10 dakika boyunca 1400 ° C'de silan ve hidrojen (hidrojen içerisinde %0.006 silan) oluşan bir karışıma maruz bırakıldı. Grafen, 1 saat boyunca vakumda (5-9x10<sup>-6</sup> mbar) büyütüldü ve ardından 500 ° C'ye soğutuldu. Büyütme hücresi 500 mbar basınca kadar hidrojen ile dolduruldu ve bir saatlik ara-kesme (intercalation) işlemi 700 ° C'de tamamlandı. Hall etkisi ölçümleri için, Hall bar geometrisi, elektron demet litografisi ile imal edilmiş uygun bir ışık maskesi (photomask) ile optik litografi kullanılarak, grafen tabakaya aktarıldı. Omik kontaklar ters litografi tekniği ile üretildi. Bu noktadan sonra da kaldırma (lift-off) ve oyma (etching) işlemleri sonrasında 1100 µm x 500 µm boyutlu (500 µm by 1100 µm) aktif grafen bölgesi elde edildi. 30 nm / 220 nm Ti / Au metal çifti kullanılarak ara bağlantı metal litografi gerçekleştirildi. Üretim işlemlerinin ayrıntıları, referans 22'de verilmiştir. Hall etkisi ölçümleri, bir soğutma sistemi kullanılarak 12 ila 300 K sıcaklık aralığının bir fonksiyonu olarak gerçekleştirilmiştir. Numuneye, akım düzlemine dik doğrultuda sabit düşük manyetik alan (B=0.5T) uygulandı. Ölçümlerde, bir sabit akım kaynağı (Keithley 2400) ve bir nanovoltmetre (Keithley 2182A) kullanıldı. Ölçümler, Bilkent Üniversitesi, Fen Fakültesi, Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir.

## 4. TEORİ

Bu örneğe ait iletim özelliklerini araştırmak için, SiC üzerine büyütülen grafenin sıcaklığa bağlı (12-300K) Hall etkisi ölçümleri elde edilmiştir. Bu Hall verileri, Basit Paralel İletim Ayırıştırma Yöntemi (SPCEM) yardımıyla, 3 boyutlu ve 2 boyutlu kanallardaki taşıyıcıların sıcaklık bağımlı mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları elde edildi.

Aşağıda sırasıyla Basit Paralel İletim Ayırıştırma Yönteminden bahsedilmiş ve grafen ve SiC alt taştaki 2-boyutlu ve 3-boyutlu taşıyıcıların saçılma mekanizmaları ele alınmıştır.

### 4.1 Basit Paralel İletim Ayırıştırma Yöntemi (SPCEM)

SPCEM analizinin uygulanmasında bir takım varsayımlardan yola çıkılmıştır [19, 20, 23, 30].

(i) Toplam iletkenliğe katkı yapan iki ana ögenin, 2-boyutlu (2B) grafen tabaka ve 3-boyutlu bulk (3B) SiC alt taştaki taşıyıcıların olduğu düşünülmüştür.

(ii) Düşük sıcaklıklarda bulk taşıyıcıların donmuş (freze-out) olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle de en düşük sıcaklıktaki Hall taşıyıcı yoğunluğunun, yalnız sıcaklıktan bağımsız 2B taşıyıcılarla ilişkili olması beklenmiştir.

(iii) Bulk taşıyıcıların termal aktivasyonundan ötürü, ölçülen sıcaklık bağımlı taşıyıcı yoğunluğu sadece bulk taşıyıcılarla ilişkili olacaktır. Bu varsayımlarla, 2B ve 3B bulk taşıyıcıların taşıyıcı yoğunluğu ve mobiliteleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

(iv) 2B ve bulk taşıyıcı yoğunlukları yaklaşık aynı mertebededirler.

SPCEM hesaplamasında, 2B taşıyıcıların mobilitesi ( $\mu_{2B}$ ) ve 3B taşıyıcıların mobilitesi ( $\mu_{Bulk}$ ), aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$\mu_{2B} = \mu_H \sqrt{\frac{n_H}{n_{2B}}} \quad (4.1)$$

$$\mu_{Bulk} = \mu_H \frac{n_H - n_{2B}}{n_H} = \mu_H \frac{n_{Bulk}}{n_H} \quad (4.2)$$

Burada,  $\mu_H$ , tek bir manyetik alandaki deneysel Hall mobilitesini,  $n_H$  ise Hall taşıyıcı yoğunluğunu ifade etmektedir. Mümkün olan en düşük sıcaklıkta,  $n_{2B} = n_H$  alınmış ve sıcaklıktan bağımsız 2B taşıyıcı yoğunluğu nedeniyle bu değer tüm sıcaklıklar için kullanılmıştır. Bulk taşıyıcı yoğunluğu ise  $n_{Bulk} = n_H - n_{2B}$  şeklinde hesaplanmıştır.

## 4.2 2-Boyutlu (2B) ve 3-Boyutlu (3B) Taşıyıcıların Saçılma Mekanizmaları

Bu çalışmada kullanılan 2B ve 3B taşıyıcıların saçılma mekanizmalarına ait analitik eşitlikler [30] aşağıdaki alt bölümlerde özetlenmiştir.

### 4.2.1 2B Taşıyıcılarda Saçılma Mekanizmaları

SiC üzerine büyütülen grafendeki taşıyıcıların, mobiliteye toplam katkısı; boyuna akustik (LA) fonon saçılmasından kaynaklı mobilite ( $\mu_{LA}$ ), uzaklaştırılmış ara-yüzey fonon (RIP) saçılmasından kaynaklı mobilite ( $\mu_{RIP}$ ) ve sıcaklıktan bağımsız mobilite ( $\mu_0$ ) terimlerinin toplamı olacak şekilde Matthiessen's kuralı ile aşağıdaki eşitlikle verilir,

$$\frac{1}{\mu_{2B}} = \frac{1}{\mu_{LA}} + \frac{1}{\mu_{RIP}} + \frac{1}{\mu_0} \quad (4.3)$$

#### 4.2.1.1 Boyuna Akustik Fonon (LA) Saçılması

Grafende LA fonon saçılmasına ait mobilite eşitliği aşağıdaki şekilde verilir.

$$\mu_{LA} = \frac{4e\hbar\rho_S v_S^2 v_F^2}{n_{2B}\pi D_A^2 k_B T} \quad (4.4)$$

Bu tabloda,  $D_A$ ,  $\rho_S$ ,  $v_S$ ,  $v_F$  ve  $k_B$  simgeleri sırasıyla deformasyon potansiyelini, grafenin 2 boyutlu kütle yoğunluğunu, boyuna akustik fonon hızını, grafenin Fermi hızını ve Boltzmann sabitini göstermektedir.

#### 4.2.1.2 Uzaklaştırılmış Ara-Yüzey Fonon (RIP) Saçılması

Grafen tabakasının yüzeyindeki ve alt yüzeyindeki optik fononlar, grafende RIP saçılmasına sebep olur. Bu saçılmadan ileri gelen mobilite ise,

$$\mu_{RIP} = \frac{1}{n_{2B}e} \left[ \sum_i \left( \frac{C_i}{\exp\left(\frac{E_i}{k_B T}\right) - 1} \right) \right]^{-1} \quad (4.5)$$

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

#### 4.2.1.3 Sıcaklıktan Bağımsız Saçılma

Sıcaklıktan bağımsız saçılma mobilitesi ( $\mu_0$ ), Coulomb saçılmasından kaynaklı mobilite ( $\mu_C$ ) ile kısa menzilli saçılmadan kaynaklı mobilitelerin ( $\mu_{SR}$ ), toplamına eşittir;

$$\frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_C} + \frac{1}{\mu_{SR}} \quad (4.6)$$

Kısa menzilli saçılma  $\mu_{SR} = \frac{A}{n_{2B}}$  dir. Burada, A sabit bir değer olup, 2B taşıyıcı yoğunluğu, SPCEM'in 2. varsayımı nedeniyle sıcaklıktan bağımsızdır. Bu nedenle, kısa menzilli saçılma, incelenen tüm sıcaklık aralığı için sabittir. Ayrıca  $\mu_C$  de sabit olup, her bir saçılma teriminin  $\mu_0$ 'a katkısını hesaplamak mümkün değildir. Bu sebeple  $\mu_C$  ve  $\mu_{SR}$  yerine,  $\mu_0$  hesaplanmıştır.

Bu alt bölüme ait mobilite hesaplamalarında kullanılan parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** 2B saçılma mekanizmalarının analizinde kullanılan grafene ait parametreler [31-33].

Parametre (2B)	Değer
$D_A$ (eV)	18
$\rho_s$ ( $\times 10^{-7}$ kg/m <sup>2</sup> )	7.6
$v_s$ ( $\times 10^4$ m/s)	2.1
$v_f$ ( $\times 10^6$ m/s)	1
$E_1$ (meV)	116
$E_2$ (meV)	6.37
$C_1$	$10^6$
$C_2$	$5.1 \times 10^3$

#### 4.2.2 3 Boyutlu (3B) Taşıyıcılarda Kullanılan Saçılma Mekanizmaları

Üç tane temel saçılma mekanizması vardır: Akustik fonon saçılması, Polar optik fonon saçılması ve iyonize safsızlık saçılması. Bu analizde kullanılan SiC parametreleri Tablo 4.2'de verilmiştir [34-37].



**Tablo 4.2:** 3B saçılma mekanizmasında kullanılan SiC'e ait parametreler [30].

Parametre (3B)	Değer
$m^*$ ( $9.1 \cdot 10^{-31}$ kg)	0.29
$\epsilon_s$ ( $\cdot \epsilon_0$ )	10.03
$\epsilon_0$ ( $\cdot 10^{-12}$ F/m)	8.85
$\hbar\omega_{po}$ (meV)	197
$C_{LA}$ ( $\cdot 10^{11}$ N/m <sup>2</sup> )	5.07
$E_D$ (eV)	18
$K$ ( $\cdot 10^8$ m <sup>-1</sup> )	8.92
$k_B$ ( $\cdot 10^{-23}$ J.K <sup>-1</sup> )	1.38
$e$ ( $\cdot 10^{-19}$ C)	1.6
$\hbar$ ( $\cdot 10^{-34}$ J.s)	1.05
$N_{IMP}$ ( $\cdot 10^{20}$ m <sup>-3</sup> )	5.4
$\tau_m$ ( $\cdot 10^{-12}$ s)	2
$k$ ( $\cdot 10^9$ m <sup>-1</sup> )	1.2284

#### 4.2.2.1 Akustik Fonon Saçılması

Akustik fonon saçılması, deformasyon potansiyeli (DP) ile piezoelektrik (PE) polarizasyon alanlarını içerir. Mobilitiyi sınırlayan deformasyon potansiyeli saçılması aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\mu_{DP} = \frac{\pi \hbar^3 C_{LA} e}{E_D^2 k_B T m^* k} \left[ 1 - \frac{q_{S3B}^2}{k^2} + \frac{q_{S3B}^4}{8k^2} \left( 3 \ln \left[ 1 + \left( \frac{2k}{q_{S3B}} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + \left( \frac{q_{S3B}}{2k} \right)^2} \right) \right]^{-1} \quad (4.7)$$

Burada,  $E_D$  deformasyon potansiyeli,  $k$  elektron dalga vektörü ve  $q_{S3B}$  3B'de ters örgü perdeleme uzunluğudur ve

$$q_{S3B}^2 = - \frac{e^2}{\epsilon_s} \int \frac{d f(E)}{d E} N(E) d (E) \quad (4.8)$$

şeklinde verilir. Bu ifadede,  $f(E)$ , Fermi-Dirac Fonksiyonunu ve  $N(E)$  de durum yoğunluğu fonksiyonudur. Piezoelektrik saçılmadan kaynaklı mobilite eşitliği ise aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\mu_{PE} = \frac{2\pi\epsilon_s\hbar^3k}{K^2ek_B Tm^{*2}} \left[ 1 - \frac{q_{s3B}^2}{k^2} + \frac{q_{s3B}^4}{8k^2} \left( 3 \ln \left[ 1 + \left( \frac{2k}{q_{s3B}} \right)^2 \right] - \frac{1}{1 + \left( \frac{q_{s3B}}{2k} \right)^2} \right) \right]^{-1} \quad (4.9)$$

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

$$\frac{1}{\mu_{AC}} = \frac{1}{\mu_{DP}} + \frac{1}{\mu_{PE}} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2.2 Polar Optik Fonon Saçılması

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

$$\mu_{PO(Bulk)} = \frac{e\tau_m}{m^*} e^{\hbar\omega_{PO}/k_B T} \quad (4.11)$$

Bu ifadede  $\hbar\omega_{PO}$  polar optik enerjisi olup,  $\tau_m$  ise momentum durulma zamanıdır.

### 4.2.2.3 İyonize Safsızlık Saçılması

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

$$\mu_{II} = \sqrt{\frac{128(k_B T)^3}{m^* \pi^3}} \frac{(4\pi\epsilon_S)^2}{Z^2 e^3 N_{imp} \left[ \ln(1+\beta^2) - \left( \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \right) \right]} \quad (4.12)$$

Bu ifadede,  $m^*$  etkin kütle;  $Z$  iyonize atomun yükü olup 1 alınmıştır.  $N_{imp}$  ise, iyonize safsızlık yoğunluğudur ve  $\beta$ , aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\beta = \frac{2m^*}{\hbar} \lambda_D \sqrt{\frac{2}{m^*} 3k_B T} \quad (4.13)$$

Bu ifadede  $\lambda_D$ , 3B perdeleme uzunluğu olup aşağıdaki şekilde verilir.

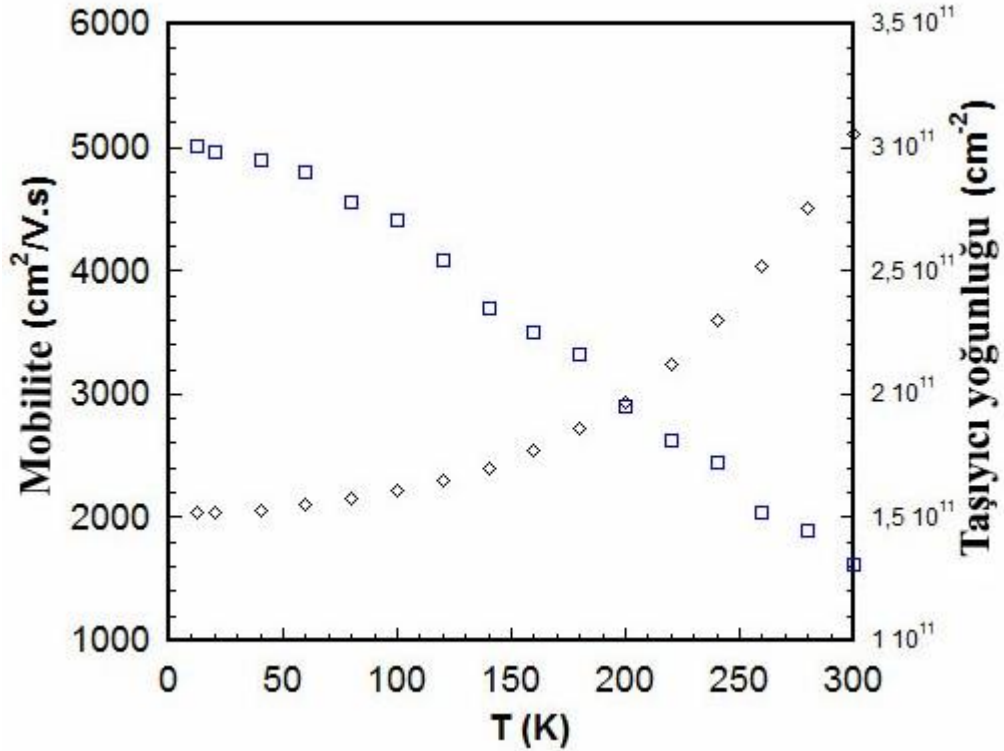
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{k_B T \epsilon_S}{e^2 n_{Bulk}}} \quad (4.14)$$

Burada,  $\epsilon_S$  statik dielektrik sabitidir.

Bu alt bölümün analizinde kullanılan parametreler ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

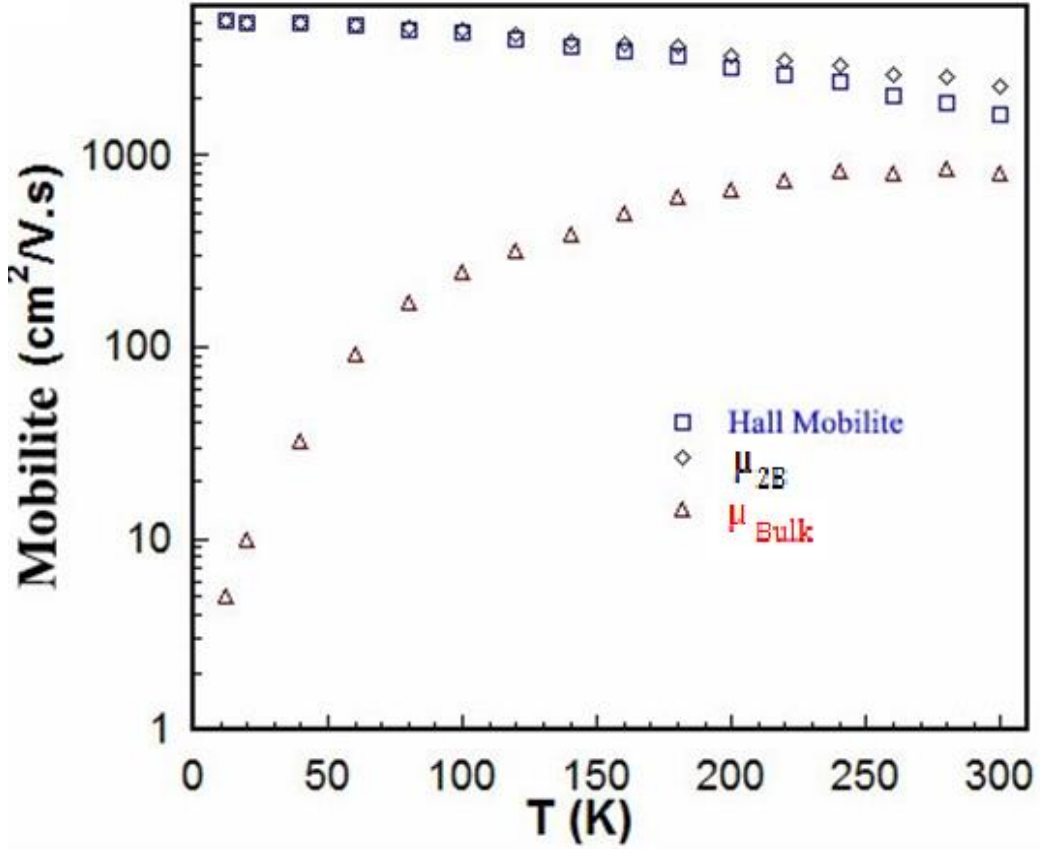
## 5. BULGULAR

Şekil 5.1, 12-300 K sıcaklık aralığında SiC alt taş üzerine büyütülen grafenin taşıyıcı yoğunluğunun ve Hall mobilitelerinin sıcaklık bağımlılığını göstermektedir.  $5000 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  düşük sıcaklık Hall mobilitesi, oda sıcaklığında  $1620 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ 'ye düşmektedir. Diğer yandan, hem bulk hem de 2 boyutlu taşıyıcıları içeren toplam taşıyıcı yoğunluğu da sıcaklık arttıkça artmaktadır. Fit eğrisinin toplam taşıyıcı yoğunluğu eksenini ile kesişmesinden, yalnız 2B grafen tabaka ile ilişkili iki boyutlu taşıyıcı yoğunluğu  $1.054 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  olarak bulunmuştur. 2B taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklıktan bağımsız hale gelmesi beklendiğinden, fazla taşıyıcılar, SiC'dan termal olarak aktive olmuş bulk taşıyıcılarla ilişkilendirilebilir.

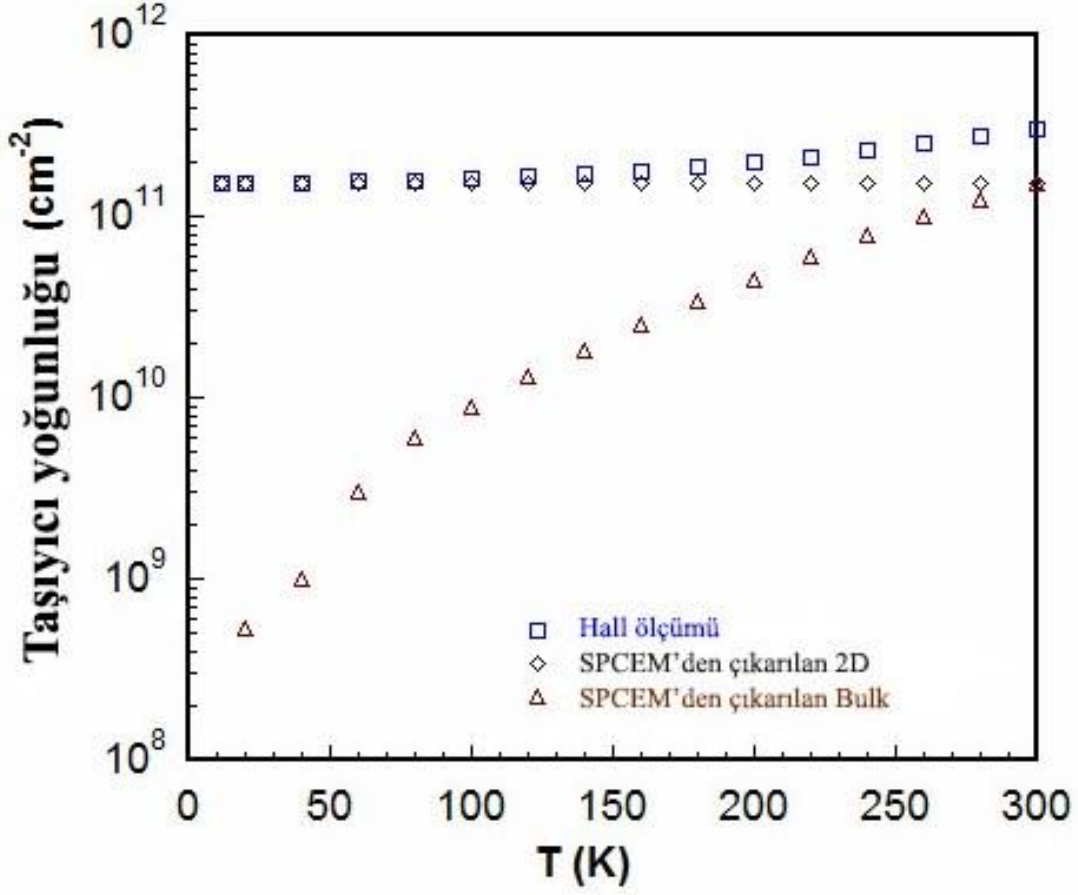


Şekil 5.1: SiC alt taş üzerinde büyütülen grafenin sıcaklığa bağlı mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu değerleri.

SPCEM'den elde edilen 2B ve bulk taşıyıcıların sıcaklığa bağlı mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları Şekil 5.2 ve 5.3'de sırasıyla gösterilmiştir. SPCEM'den elde edilen 2B grafen tabakaya ve bulk SiC'a ait mobiliteler oda sıcaklığında sırasıyla  $2296 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  ve  $813 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  olarak hesaplanmıştır.

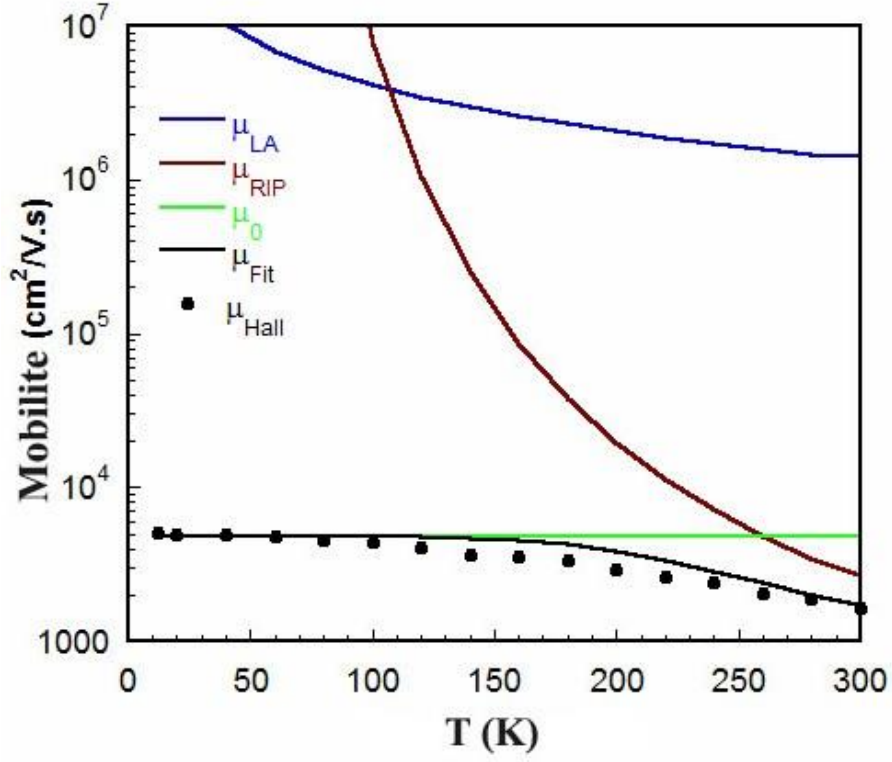


Şekil 5.2: Hall mobilitesi ve SPCEM'den çıkarılan 2B ve bulk taşıyıcıların sıcaklığa bağlı mobiliteleri.

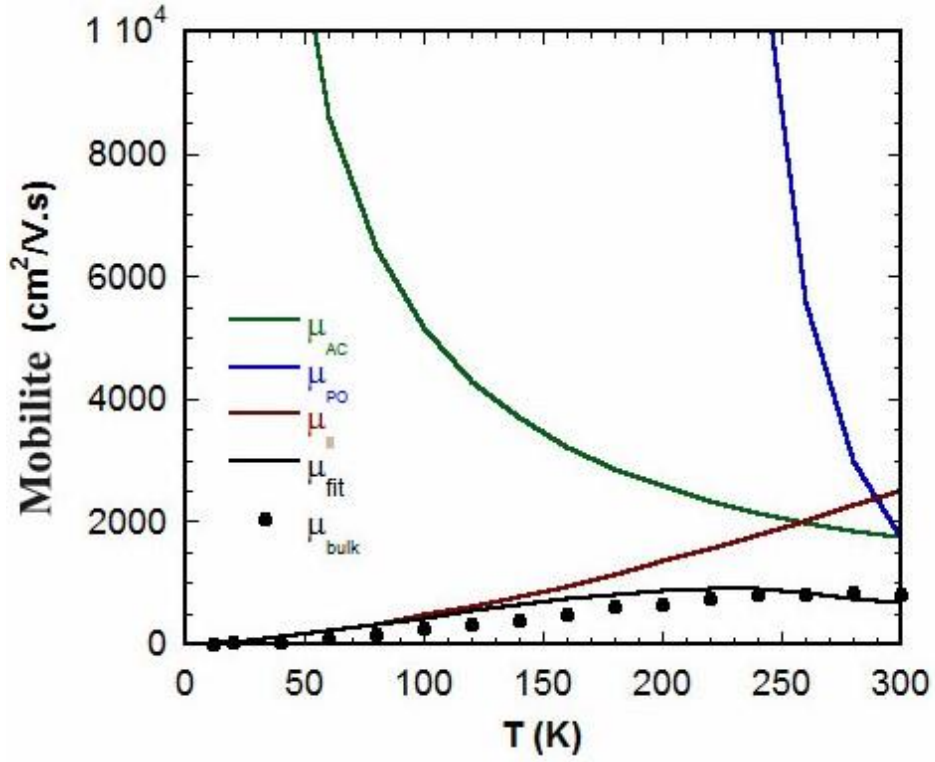


Şekil 5.3: Hall ölçümünün taşıyıcı yoğunluğu ve SPCEM'den çıkarılan 2B ve bulk taşıyıcıların taşıyıcı yoğunluğu.

SPCEM analizinden elde edilen 2B grafen tabaka ve 3B SiC alt taş a ait saçılma mekanizmaları ile ilişkili Hall mobiliteleri sırasıyla Şekil 5.4 ve 5.5'de gösterilmiştir. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, Coulomb saçılmasını ve kısa menzilli saçılmayı içeren sıcaklıktan bağımsız mobilite ( $\mu_0$ ), düşük sıcaklıkta baskın saçılma mekanizmalarıdır. Yüksek sıcaklıklarda ise mobilite, sıcaklıktan bağımsız saçılma ( $\mu_0$ ) ile uzaklaştırılmış ara yüzey fonon saçılmalarının ( $\mu_{RIP}$ ) kombinasyonu ile sınırlanmıştır. Şekil 5.5'de, mobilitenin sıcaklığa bağımlılığı açık bir şekilde, düşük sıcaklıkta iyonize safsızlık saçılmasının baskın olduğu bildik bir 3B karakteri gibi hareket etmekte olup, sıcaklık arttıkça, akustik ve optik fononlara bağlı saçılma da toplam mobilite değerinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Bulk saçılma analizinden, iyonize safsızlık konsantrasyonu ile LO-fononların momentum durulma zamanı sırasıyla  $5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$  ve  $1.4 \times 10^{16} \text{ s}$  fit parametresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.4: SPCEM analizinden elde edilen 2B grafen tabakaya ait saçılma mekanizmaları ile ilişkili hall mobiliteleri.



Şekil 5.5: SPCEM analizinden elde edilen 3B SiC alt taşta ait saçılma mekanizmaları ile ilişkili hall mobiliteleri.

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

SiC alt taş üzerine büyütülen grafenin Hall etkisi ölçümleri, düşük manyetik alanda (0.5T) sıcaklığın bir fonksiyonu (12-300 K) olarak elde edilmiştir. SPCEM hesaplama yöntemiyle, Hall verileri kullanılarak, grafenin 2 boyutlu taşıyıcısının ve SiC alt taş bulk taşıyıcısının sıcaklığa bağlı mobiliteleri ve taşıyıcı yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu çalışmada, yüksek sıcaklıkta grafen tabakadan  $2296 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  yüksek taşıyıcı mobilitesi ve SiC'den  $813 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$  düşük taşıyıcı mobilitesi elde edilmiştir. SPCEM ile ortaya çıkarılan taşıyıcı verileriyle 3B ve 2B saçılma mekanizmaları incelenmiş, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki baskın saçılma mekanizmaları belirlenmiştir. Tek tabaka grafenin mobilitelerinin, hem 2B grafen ve hem de 3B SiC saçılma süreçlerinin birleşimiyle belirlendiği ortaya konulmuştur.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., and Firsov, A. A., “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films”, *Science*, 306, 666, (2004).
- [2] Geim, A. K., and Novoselov, K. S., “The rise of graphene”, *Nature Materials*, 6, 183, (2007).
- [3] Neto, A. H. C., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., and Geim, A. K., “The electronic properties of graphene”, *Rev. Modern Phys.*, 81, 109, (2009).
- [4] Wei, D., Liu, Y., Wang, Y., Zhang, H., Huang, L. and Yu, G., “Synthesis of N-Doped Graphene by Chemical Vapor Deposition and Its Electrical Properties”, *Nano Lett.* 9, 1752, (2009).
- [5] Cheianov, V.V., Falko, V., Altshuler, B.L., “The Focusing of Electron Flow and a Veselago Lens in Graphene p-n Junctions”, *Science*, 315, 125, (2007).
- [6] Li, X.L., Wang, X.R., Zhang, L., Lee, S.W., Dai, H.J., “Chemically Derived, Ultrasmooth Graphene Nanoribbon Semiconductors”, *Science*, 319, 1229, (2008).
- [7] Areshkin, D.A., White, C.T., “Building Blocks for Integrated Graphene Circuits”, *Nano Lett.*,7, 3253, (2007).
- [8] Morozov, S.V., Novoselov, K., Katsnelson, M., Schedin, F., Elias, D., Jaszczak, J., Geim, A., “Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer”, *Phys. Rev. Lett.*, 100,016602, (2008).
- [9] Chen, J.H., Jang, C., Xiao, S., Ishigami, M., Fuhrer, “Intrinsic and Extrinsic Performance Limits of Graphene Devices on SiO<sub>2</sub>”, *M.S., Nature Nanotec.*,3, 206, (2008).

- [10] Pallecchi, E., Lafont, F., Cavaliere, V., Schopfer, F., Maily, D., Poirier, W. and Ouerghi, A., “High Electron Mobility in Epitaxial Graphene on 4H-SiC(0001) via post-growth annealing under hydrogen”, *Scientific Reports*, 4558, (2014).
- [11] Norimatsu, W. and Kusunoki, M., “Epitaxial graphene on SiC{0001}: advances and perspectives”, *Phys. Chem.Chem, Phy.*, 16, 3501, (2014).
- [12] Tanabe, S., Sekine, Y., Kageshima, H., Nagase, M., Hibino, H., “Carrier transport mechanism in graphene on SiC(0001)”, *Phys. Rev.B.*, 84, 115458, (2011).
- [13] Kane, M. J., Apsley, N., Anderson, D. A., Taylor, L. L., and Kerr, T., “Parallel conduction in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As modulation doped heterojunctions” *J. Phys. C. Solid StatePhys.*, 18, 5629, (1985).
- [14] Beck, W. A. and Anderson, J. R., “Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent Hall technique”, *J. Appl. Phys.*, 62, 541, (1987).
- [15] Meyer, J. R., Hoffman, C.A., Bartoli, F.J., Arnold, D.J., Sivananthan, S., Faurie, J.P., “Methods for magnetotransport characterization of IR detector materials”, *Semicond. Sci.Technol.*,8, 805, (1993).
- [16] Tobin, S.P., Pultz, G.N., Krueger, E.E., Kestigian, M., Wong, K.K., Norton, P.W., “Hall effect characterization of LPE HgCdTe P/n heterojunctions”, *J. Electron.Mater.*,22, 907, (1993).
- [17] Dziuba, Z., Antoszewski, J., Dell, J.M., Faraone, L., Kozodoy, P., Keller, S., Keller, B., DenBaars, S.P., Mishra, U.K., “Magnetic field dependent Hall data analysis of electron transport in modulation-doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures” *J. Appl. Phys.*, 82, 2996, (1997).
- [18] Lisesivdin, S. B., Balkan, N., and Özbay, E., “A simple parallel conduction extraction method (SPCEM) for MODFET’s and undoped GaN-based HEMTs ”, *Microelectronics J.*, 40, 413, (2009).

- [19] Lisesivdin, S. B., Yildiz, A., Balkan, N., Kasap, M., Özcelik, S., and Özbay, E., “Scattering analysis of two-dimensional electrons in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> with bulk related parameters extracted by simple parallel conduction extraction method”, *J.Appl.Phys.*, 108, 013712, (2010).
- [20] Yildiz, A., Lisesivdin, S. B., Kasap, M., Ozcelik, S., Ozbay, E., and Balkan, N., “Investigation of low-temperature electrical conduction mechanisms in highly resistive Ga<sub>N</sub> bulk layers extracted with Simple Parallel Conduction Extraction Method”, *Appl. Phys. A.*, 98, 557, (2010).
- [21] Tülek, R., Arslan, E., Bayraklı, A., Turhan, S., Gökden, S., Duygulu, Ö., Kaya, A. A., Firat, T., Teke, A., and Özbay, E., “The effect of Ga<sub>N</sub> thickness inserted between two Al<sub>N</sub> layers on the transport properties of a lattice matched AlIn<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> double channel heterostructure”, *Thin Solid Films*, 551, 146, (2014).
- [22] Arslan, E., Çakmakyapan, S., Kazar, Ö., Bütün, S., Lisesivdin, S.B., Cinel, N.A., Ertaş, G., Ardalı, S., Ul-Hassan, J., Janzen, E. and Özbay, E., “SiC Substrate effects on electron transport in the epitaxial graphene layer”, *Electron. Mater.Lett.*,10, 387, (2014).
- [23] Lisesivdin, S.B., Atmaca, G., Arslan, E., Çakmakyapan, S., Kazar, Ö., Bütün, S., Ul-Hassan, J., Janzen, E., and Özbay, E., “Extraction and scattering analyses of 2B and bulk carriers in epitaxial graphene-on-SiC structure”, *Physica E.*, 63, 87,(2014).
- [24] Yazdi, G. R., Iakimov, T., and Yakimova, R., “Epitaxial Graphene on SiC: A Review of Growth and Characterization”, *Crystals.*, 6(5), 53, (2016).
- [25] Heer, W. A. D., “Epitaxial graphene: A new electronic material for the 21st century”, *MRS Bulletin.*,36, 8, (2011).
- [26] Zhu, B. Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., and Ruoff, R. S., “Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties and Applications”, *Adv. Mater.*, 22, 3906–3924, (2010).

- [27] Nanoteknoloji ve Nanotıp Bilim Dergisi, 16, (2012). (13.08.2018).
- [28] Wilson, M., ‘‘Electrons in atomically thin carbon sheets behave like massless particles’’, Phys. Today 59, No.1, 21, (2006).
- [29] <https://seminarlinks.blogspot.com.tr/2014/04/graphene-ppt.html> (13.08.2018).
- [30] Ağızaçmak, S., Tülek, R., Gökden, S., Teke, A., Arslan, E., Aygar, A. M., Özbay, E., ‘‘Transport properties of epitaxial graphene grown on SiC substrate’’, Oam-Rc, Vol. 11, No. 3-4, p. 197 – 201, ( 2017).
- [31] Sun, D., Wu, Z., Divin, C., Li, X., Berger, C., De Heer, W.A., First, P.N., Norris, T. B., Phys. Rev. Lett. 101-157402, (2008).
- [32] Dean, C.R., Young, A.F., Meric, I., Lee, C., Wang, L., Sorgenfrei, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kim, P., Shepard, K.L., Hone, J., Nat. Nanotechnol. 5-722, (2010).
- [33] Ferry, D.K., Semiconductor Transport, Taylor and Francis, London 122, (2000).
- [34] Son, N.T., Chen, W.M., Kordina, O., Konstantinov, A.O., Monemar, B., Janzen, E., Hofman, D.M., Volm, D., Drechsler, M., Meyer, B. K., Appl. Phys. Lett. 66-1074, (1995).
- [35] Patrick, L., Choyke, W. J., Phys. Rev. B 2-2255, (1970).
- [36] Tanabe, S., Sekine, Y., Kageshima, H., Nagase, M., Hibino, H., Phys. Rev. B 84-115458, (2011).
- [37] Kamitani, K., Grimsditch, M., Nipko, J.C., Loong, C.K., Okada, M., Kimura, Appl. Phys. 82-3152, (1997).