

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

**Yüksek Lisans Tezi**

**TLM METODU İLE GRAFEN ÜZERİNE YAPILAN  
METAL KONTAKLARIN DİRENCİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Enes YAYAN**

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

**Yozgat 2014**



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

**Yüksek Lisans Tezi**

**TLM METODU İLE GRAFEN ÜZERİNE YAPILAN  
METAL KONTAKLARIN DİRENCİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Enes YAYAN**

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

**Yozgat 2014**

**T.C.**  
**BOZOK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEZ ONAYI**

Enstitümüzün Fizik Anabilim Dalı 70110511019 numaralı öğrencisi Enes YAYAN'ın hazırladığı "TLM Metodu ile Grafen Üzerine Yapılan Metal Kontaktların Direncinin Belirlenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 17/03/2014 Pazartesi günü saat 10:30'da yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Recep ŞAHİNGÖZ

Üye : Doç.Dr. Hidayet ÇETİN (Danışman)

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ümit TEMİZER

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ...../20..... tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../20.....

(Ünvanı, Adı Soyadı)  
Müdür

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>8</b>
2.1. Grafenin Elektriksel Özellikleri .....	9
2.2. Grafen/Metal Kontakların Özellikleri .....	12
2.3. Kontak Direnci Ölçüm Teknikleri .....	13
2.3.1. 2-Nokta Metodu .....	13
2.3.2. 4-Nokta Metodu .....	16
2.3.3. TLM (Transfer Length Measurement) Metodu.....	20
2.3.4. 6-Nokta Metodu .....	22
<b>3. GRAFENİN SENTEZLENMESİ VE YÖNTEMLER</b> .....	<b>23</b>
3.1. Grafenin Sentezlenmesi .....	23
3.1.1. Kaydırma Yöntemi.....	23
3.1.2. Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi .....	24
3.1.3. Silisyum-Karbon Üzerinde Epitaksiyel Büyütme Yöntemi.....	24
3.1.4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi .....	24
3.2. Grafenin Raman Spektrumu.....	25
3.3. Litografi.....	27
3.4. Termal Buharlaştırma İşlemi.....	28

<b>4. DENEYSEL BULGULAR .....</b>	<b>30</b>
4.1. Numunelerin Üretilmesi.....	30
4.2. Elektriksel Ölçüm Aşaması.....	33
4.3. İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi .....	33
4.4. Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi .....	43
4.5.Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi.....	50
<b>SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>60</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>62</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>70</b>

# TLM METODU İLE GRAFEN ÜZERİNE YAPILAN METAL KONTAKLARIN DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

Enes YAYAN

Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi

2014; Sayfa:70

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hidayet ÇETİN

## ÖZET

Grafen Alan Etkili Transistör üretiminde elektriksel iletimi sağlamak amacıyla grafene elektriksel kontaklar yapılmaktadır. Kontak yapılan her bir metal kendine özgü kontak direnci oluşturmaktadır. Düşük kalitedeki metal kontaklar grafen kullanılan elektronik aygıtlarda grafenin yüksek performansını kötüleştirmekte ve de umut vadeden bir malzeme olmaktan çıkarmaktadır. Bundan dolayı grafene kaliteli omik kontaklar oluşturmak bilim açısından bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında grafen üzerine İndiyum/Altın (8/20 nm), Kadmiyum/ Altın (8/30 nm) ve Krom/Altın-Germanyum (3/50 nm) kontakları üretilmiş ve bu kontakların elektriksel iletim açısından kalitesi TLM yönteminden elde edilen kontak dirençleri ile belirlenmiştir. Elde edilen kontak öz dirençleri İndiyum/Altın kontak için 1800  $\Omega\mu\text{m}$ , Krom/Altın-Germanyum kontak için 1475  $\Omega\mu\text{m}$  elde edilirken Kadmiyum/ Altın kontak için bu değer 546  $\Omega\mu\text{m}$  bulunmuştur. Literatür incelendiğinde Kadmiyum/Altın kontak için bulunan değer diğer metallere göre oldukça umut vaat edici görünmektedir. Ayrıca yapılan ölçümlerde Kadmiyum/Altın kontak için öz direncinin uygulanan kapı voltajından bağımsız bir karakteristik sergilediği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Grafen, Kontak Direnci, TLM, İndiyum, Kadmiyum, AltınGermanyum

# **DETERMINATION RESISTANCE OF METAL CONTACTS FABRICATED ON GRAPHENE BY TLM METHOD**

**Enes YAYAN**

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

**2014; Page:70**

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Hidayet ÇETİN**

## **ABSTRACT**

While Graphene Field Effect Transistor is fabricated, metal electrical contacts are deposited on graphene to provide electrical transmission. Each metal has different specific contact resistance. Low-quality metal contacts cause performance killer effect and remove high performance of promising material, graphene. Therefore, forming high quality ohmic contacts to graphene is essential in terms of science. In this thesis Indium/Gold (8/20 nm), Cadmium/Gold (8/30 nm) and Chrome/Gold-Germanium (3/50 nm) contacts are made on the graphene and in terms of electrical conduction the contact quality is determined from TLM measurements. The specific contact resistivity was found as  $1800 \Omega\mu\text{m}$  for Indium/Gold contact,  $1475 \Omega\mu\text{m}$  for Chrome/Gold contact and  $546 \Omega\mu\text{m}$  for Cadmium/Gold contact, respectively. When reviewing the literature, Cadmium/Gold contact seem to be quite promising material. Furthermore, it was found that specific resistance of Cadmium/Gold contact shows independent characteristics from the applied gate voltage.

**Keywords:** Graphene, Contact Resistance, TLM, Indium, Cadmium, GoldGermanium



## TEŞEKKÜR

Tez alışmamın tamamlanmasında emek ve yardımlarını esirgemeyen ve alışmalarım süresince değerli fikir ve tecrübeleri ile bana büyük destek sağlayan saygıdeğer hocam Do. Dr. Hidayet ETİN'e içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve tecrübeleri ile bana yardımcı olan Arř. Gör. Behiye BOYARBAY KANTAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam sırasında değerli yorum ve yardımlarından ötürü çalışma arkadaşlarım Tuęba GÜÇLÜ, Aslı TURAN ve Sema GÖLGEÇİ'ye teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince gösterdikleri anlayışlarını ve maddi ve manevi yönden desteklerini hiç eksik etmeyen değerli aileme en içten dileklerle teőekkürlerimi sunarım.

## TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 4.1:</b> Kullanılan Metal/Grafen Kontakların Belirlenen Özellikleri .....	58
<b>Tablo 4.2:</b> Literatürdeki Bazı Metal/Grafen Kontakların Belirlenmiş Özellikleri.....	59

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 2.1:</b> (a) Karbon Nanotüp (CNT), (b) Fulloren, (c) Grafen' in görüntüsü..	8
<b>Şekil 2.2:</b> Grafenin (A) Tek Tabaka, (B) İki Tabaka Olduğu Durumdaki Enerji Aralığı, (C) Elektrik Alan Uygulanması Durumunda İki Tabakalı Grafenin Enerji Aralığı.....	9
<b>Şekil 2.3:</b> Grafenin Hegzagonal Yapısının Temsili Gösterimi.....	10
<b>Şekil 2.4:</b> Grafenin Çeşitli Özelliklerinin Bilinen Diğer Malzemeler İle Karşılaştırılması .....	11
<b>Şekil 2.5:</b> Kaynak-Akaç Akımının kapı gerilimi ile değişimi.....	12
<b>Şekil 2.6:</b> (a) Yatay, (b) Dikey 2-Nokta Kontak Ölçüm Şeması.....	14
<b>Şekil 2.7:</b> Dikey 2-Kontak Ölçüm Şemasının Yandan ve Üstten Görüntüsü...	15
<b>Şekil 2.8:</b> Direnç Ölçüm Şeması .....	16
<b>Şekil 2.9:</b> TLM ölçüm grafiği .....	17
<b>Şekil 2.10:</b> Grafen/Metal Kontakın Şeması .....	18
<b>Şekil 2.11:</b> TLM test şeması .....	19
<b>Şekil 2.12:</b> TLM ölçüm grafiği .....	20
<b>Şekil 2.13:</b> 4-Nokta Direnç Ölçüm Şemasının (a) Yanal, (b) Dikey Görüntüsü..	21
<b>Şekil 2.14:</b> 6-Nokta Direnç Ölçüm Şeması .....	22
<b>Şekil 3.1:</b> Kaydırma Yönteminde Kullanılan Malzemelerin Fotoğrafi.....	23
<b>Şekil 3.2:</b> (a), (b) ve (c) Tek Tabaka Grafen, Birkaç Tabaka Grafen ve Grafitin Raman Spektrumlarını Göstermektedir.....	26
<b>Şekil 3.3:</b> Optik Litografi İşleminin Şematik Gösterimi.....	27

<b>Şekil 3.4:</b>	Termal Buharlaştırma Sisteminde Isıtıcı Flamanların Fotoğrafı.....	28
<b>Şekil 4.1:</b>	Grafenin Optik Mikroskop Görüntüsü.....	30
<b>Şekil 4.2:</b>	Deneyler Esnasında Kullanılan Grafenin Raman Spektrumu.....	31
<b>Şekil 4.3:</b>	Litografi İşlemi Yapılmış Grafen Numunenin Görüntüsü.....	32
<b>Şekil 4.4:</b>	Grafen Alan Etkili Transistörün Elektriksel Ölçüm Şeması.....	33
<b>Şekil 4.5:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün 100X Optik Mikroskop Görüntüsü.....	34
<b>Şekil 4.6:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-50$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	35
<b>Şekil 4.7:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	35
<b>Şekil 4.8:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	36
<b>Şekil 4.9:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	36
<b>Şekil 4.10:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	37
<b>Şekil 4.11:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=0$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	37
<b>Şekil 4.12:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	38
<b>Şekil 4.13:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	38
<b>Şekil 4.14:</b>	İndiyum/Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	39
<b>Şekil 4.15:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	39

<b>Şekil 4.16:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=50$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	40
<b>Şekil 4.17:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği.....	41
<b>Şekil 4.18:</b>	İndiyum/Altın Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kontak Özdirenci Grafiği.....	41
<b>Şekil 4.19:</b>	İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_{DS}=0.01$ V'da Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği.....	42
<b>Şekil 4.20:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün 100X Optik Mikroskop Görüntüsü.....	43
<b>Şekil 4.21:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-50$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	43
<b>Şekil 4.22:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	44
<b>Şekil 4.23:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	44
<b>Şekil 4.24:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	45
<b>Şekil 4.25:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	45
<b>Şekil 4.26:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=0$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	46
<b>Şekil 4.27:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	46
<b>Şekil 4.28:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	47
<b>Şekil 4.29:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	47

<b>Şekil 4.30:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	48
<b>Şekil 4.31:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=50$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	48
<b>Şekil 4.32:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği.....	49
<b>Şekil 4.33:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kontak Özdirenci Grafiği.....	49
<b>Şekil 4.34:</b>	Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_{DS}=0.01$ V'da Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği.....	50
<b>Şekil 4.35:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün 100X Optik Mikroskop Görüntüsü.....	51
<b>Şekil 4.36:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-50$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	51
<b>Şekil 4.37:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	52
<b>Şekil 4.38:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	52
<b>Şekil 4.39:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	53
<b>Şekil 4.40:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=-10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	53
<b>Şekil 4.41:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=0$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	54
<b>Şekil 4.42:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=10$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	54
<b>Şekil 4.43:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=20$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	55
<b>Şekil 4.44:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=30$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	55

<b>Şekil 4.45:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	56
<b>Şekil 4.46:</b>	Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_G=40$ V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği.....	56
<b>Şekil 4.47:</b>	Krom-Altın Germanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği.....	57
<b>Şekil 4.48:</b>	Krom-Altın Germanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kontak Özirenci Grafiği.....	57
<b>Şekil 4.49:</b>	Krom-Altın Germanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün $V_{DS}=0.01$ V'da Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği.....	58

## KISALTMALAR LİSTESİ

0D	: Sıfır Boyut
1D	: Bir Boyut
3D	: Üç Boyut
CNT	: Karbon NanoTüp
Gpa	: Gigapascal
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
STM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu
FET	: Alan Etkili Transistör
RLB	: Şarjedilebilir Lityum İyon Pil
LCD	: Sıvı Kristal Ekran
LED	: Işık Yayan Diyot
DOS	: Durum Yoğunluğu
GFET	: Grafen Alan Etkili Transistör
Cr	: Krom
Au	: Altın
Ti	: Titanyum
Ni	: Altın
$R_m$	: Metal Direnci



R <sub>c</sub>	: Kontak Direnci
K	: Kelvin
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Pt	: Platin
Pd	: Paladyum
Ag	: Gümüş
Co	: Kobalt
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum DiOksit
XPS	: X Işını Foto Elektron Spektroskopisi
SG	: Tek Tabaka Grafen
BG	: İki Tabaka Grafen
FG	: Birkaç Tabaka Grafen
GO	: Grafen Oksit
CBKR	: Cross-Bridge Kelvin Direnç Ölçüm
HOPG	: Yüksek Yönelimli Pirolitik Grafit
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
SiC	: Silisyum Karbür
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
Si	: Silisyum
Ir	: İridyum

$C_2H_5OH$  : Etil Alkol

UV : Ultra Viyole

MIF Tetra Metil Amonyum Hidroksit

# 1.GİRİŞ

Son yıllardaki en önemli araştırma malzemelerinden biri olan grafen, iki boyutlu bir karbon kristalidir [1]. 10 yıl öncesine kadar iki boyutlu bir kristalin var olamayacağına inanılıyordu. Bu teori 1930'lu yıllarda Peierls [2] ve Landau [3] tarafından ileri sürülmüştü. Peierls ve Landau termodinamik kararsızlıklardan dolayı iki boyutlu kristalin serbest halde bulunmasının imkânsız olduğunu öngörmüşlerdi. Mermin [4] bu teoriyi iki boyuttaki kristal düzensizliğini de geliştirerek ispatlamıştı.

Özellikle ince filmler üzerine yapılan birçok deney bu teori ile uyuşmaktadır. Bu deneyler belli kalınlıklar altında atomik film tabakalarının termodinamik olarak düzensiz olacağını ve adacıklara ayrılacağını göstermiştir [5]. Bu nedenle atomik tek tabakalar, üç boyutlu yapıların sadece tümleyici bir parçası olarak bilinirdi. Atomik tek tabakalar genellikle uygun kristal örgüsüne sahip bulk kristalin uç kısmında epitaksiyel olarak büyütülür [6].

2004 yılında Manchester üniversitesinde, A.Geim *ve ark.* [7] Scotch band yöntemi olarak bilinen bir metod ile grafitten tek tabaka grafen numunesini üretmişlerdir. Yapılan bu üretime kadar üç boyutlu bir taban olmadan iki boyutlu bir malzemenin oluşamayacağı düşünülüyordu.

İki boyutlu bir kristal olan grafen, hegzagonal yapıda dizilmiş tek tabaka karbon atomlarından oluşmaktadır. Sahip olduğu bal peteği örgüsü, diğer önemli karbon allotroplarının temel yapısını oluşturmaktadır. İki boyutlu grafeni futbol topu şeklinde paketlediğimizde sıfır boyutlu (0D) fullorenleri, silindir şeklinde bir eksen etrafında katladığımızda bir boyutlu (1D) karbon nanotüpleri (CNT) ve üst üste istiflediğimizde ise üç boyutlu (3D) grafiti oluşturmaktadır [8]. Grafenin önemli bir özelliği de kütesiz Diracfermiyonları içermesidir. Bu kütesiz Dirac fermiyonları [9] oda sıcaklığında Kuantum hall etkisini etkilemektedir [10]. Aynı zamanda grafen oda sıcaklığında  $200.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  taşıyıcı mobilitesine sahiptir [11]. Grafen geniş yüzey alanı ( $\sim 2600 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ) [12] ile yüksek yüzey/hacim oranına sahiptir. Grafen yaklaşık  $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  termal iletkenlik sergilemektedir [13]. Yüksek Young modülüne ( $\sim 1000 \text{ Gpa}$ ) ve kırılma direncine ( $\sim 130 \text{ Gpa}$ ) sahiptir [14].Grafen, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Taramalı Tünelleme

Mikroskobu (STM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı ve Raman Spektroskopisi ile karakterize edilmiştir [15]. AFM görüntüleri grafenin tabaka sayısını belirler. STM ve TEM görüntüleri grafenin morfolojisini ve yapısını belirlemede faydalıdır. Raman spektroskopisi ise grafenin elektronik yapısını ve tabaka sayısını belirlemek için önemli bir araçtır [16].

Grafen henüz teknolojik olarak üretilen herhangi bir üründe karşımıza çıkmasada laboratuvar koşullarında birçok uygulama alanına sahiptir. Bunlardan bazıları, Alan Etkili Transistörler (FET), Yüksek Frekanslı Transistörler, Şarjedilebilir Lityum İyon Piller (RLB) ve Elektrokimyasal çift tabaka kapasitörlerdir. Aynı zamanda grafen Sıvı Kristal Ekranlar (LCD) ve dokunmatik ekranlarda şeffaf iletken filmler olarak kullanılabilir ve Işık Yayan Diyotlarda (LED), İndiyum Kalay Oksit (ITO) tabanlı elektrotlar yerine kullanılabilir. Diğer yandan gazlara ve biyo moleküllere karşı sensör olarak kullanılmaktadır [17].

Özetle grafen olağanüstü özelliklere sahip yeni bir malzemedir. Üretimi ve erişilebilirliği için fazlaca metot bulunmaktadır. Grafen hidrojen depolamadan hastalıklar için biyosensör olarak kullanılmasına kadar birçok uygulama alanına sahip gelecek için ümit verici bir malzemedir.

Elektronik devre elemanı üretiminde kullanılan tüm diğer yarıiletken malzemelerde olduğu gibi grafene de düşük dirençli omik kontakların gerçekleştirilmesi, bu malzemenin eşsiz özelliklerini sergileyebilmesi açısından önemlidir. Depo edilen her bir metal kendine özgü bir kontak direnci oluşturmaktadır. Bu dirençlerin TLM yöntemi ile belirlenmesi, grafenden üretilecek elektronik aygıtların performansında iyileştirmelere neden olabilecektir. Bundan dolayı hangi metalin ne kadarlık kontak direnci oluşturacağını bilmesi önemlidir.

2009 yılında Russo *ve ark.* yaptıkları bir çalışmada, bilinen farklı kalınlıklarda grafen tabakalar ve metal arasındaki arayüzeyde meydana gelen toplam kontak direnci ile ilgili sistematik bir rapor sunmuşlardır. Bu araştırmacılar kontak metali olarak titanyum kullanmışlardır. Birçok farklı grafen tabakalarından üretilmiş cihazları karşılaştırarak, kontak direncinin kapı (gate) voltajından bağımsız olduğunu ispatlamışlardır. Kontak ile metal arasında bir yük geçişi olduğunu ve bu yük

geçişinin grafenin Fermi seviyesinde bir değişime neden olduğunu öne sürmüşlerdi. Ölçümlerinde TLM metodunu kullanmışlar ve Ti/Au kontağı için kontak direncini ( $R_c$ )  $800 \pm 200 \Omega\mu\text{m}$  olarak bulmuşlardır. Ayrıca kontak direncinin uygulanan kapı voltajı ile değiştiğini göstermişlerdir [18].

Yine 2009 yılında K.Nagashio *ve ark.* yaptıkları bir incelemede, Grafenin elektronik cihaz uygulamalarında, kontak özelliklerinin kanal mobilitesinden daha önemli olduğunu vurgulamışlardı. Grafendeki oldukça düşük durum yoğunluğu (DOS) nedeni ile grafen/metal kontaklarda birçok eşsiz davranışın meydana geleceğini öngörmüşler ve çalışmalarında metal/grafen arayüzeylerinde neler olduğunu açıklamayı ve kontak direncini tanımlamayı amaçlamışlardır. Deneylerinde Cr/Au, Ti/Au ve Ni metallerini, ölçüm metodu olarak da 4 Nokta (four-point probe) ve 2 Nokta (two-point-probe) ölçüm metodunu kullanmışlardır. Cr/Au ve Ti/Au kontaklar için kontak direncini  $10^3$ - $10^6 \Omega\mu\text{m}$  civarında ve genellikle yüksek değerde bulmalarına karşın Ni kontaklar için kontak direncini yaklaşık  $500 \Omega\mu\text{m}$  civarında ölçmüşlerdir. Metal/Grafen kontakların iki önemli rol oynadıklarını, bunların birinin Metal/grafen arayüzeylerindeki fiziksel ve kimyasal ilişki olduğunu ve diğerinin ise metal ve grafenin Fermi seviyelerinin kontak yapıldığında eşitlenmelerinden dolayı metal/grafen arayüzeylerinde bir yük transferi olduğudur. Fakat bunların yanı sıra durum yoğunluğu belirli bir düzeyde ise Fermi seviyesinin sabitlenmesi (pinning) ve arayüzey dipolleride dikkate alınmalıdır [19].

A. Conwill'in 2010 yılında gerçekleştirdiği bir çalışmada, kontak direncinin taşıyıcı çeşidi ve tabaka direnci ile değişimini incelenmiştir. Deneylerinde basit bir grafen transistör kullanmışlardır. Kontak metalleri olarak Ti/Au metallerini, kontak direncini belirlemek için ise TLM yöntemini kullanmıştır. TLM ölçümlerinde kontak direncinin taşıyıcı tipinden bağımsız olduğu görülmüştür. Ayrıca kontak direncinin ve spesifik kontak direncinin her ikisinde grafenin tabaka direncinden bağımsız olduğunu ve spesifik kontak direncinin  $10^{-6} \Omega\text{cm}^2$  civarında olduğunu gösterilmiştir [20].

2010 yılında yine K.Nagashio *ve ark.* metal ve grafen arasındaki kontağın özelliklerini incelemek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdi. 4 Nokta metodunu kullanarak kontak direncini analiz etmişlerdi. Kontak metali olarak Cr/Au, Ti/Au ve

Ni metalleri kullanmışlardır. Ni kontağın spesifik kontak direncini  $5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  olarak belirlemişlerdir. Daha sonra metal/grafen kontaklarda kenar iletimini anlamak için TLM yönteminden faydalanarak bir tartışma oluşturmuşlardır. Ayrıca grafen ile kontak metali arasındaki iş fonksiyonları farkın en fazla olduğu durumda kontak direncinin minimum olduğunu göstermişlerdir [21].

2010 yılında gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise A.Venugopol *ve ark.* Grafen Alan Etkili Transistörlerdeki (GFET) metallerin kontak direnci ile ilgili bir çalışma sunmuşlardır. Ölçümlerinde TLM yöntemini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada kontak metali olarak Ni kullanılmış, kontak direnci yaklaşık  $790 \Omega \mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Kontak direncinin grafen temelli cihazlarda toplam dirence kaydedeğer bir katkı sağladığını, Ni için spesifik kontak direncinin Back-gate voltajından ve grafenin tabaka sayısından bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir [22].

F. Xia *ve ark.* 2011 yılında yüksek kaliteli grafen transistörlerin üretiminde grafen ve metal kontaklar arasındaki yüksek kaliteli eklemlerin çok önemli olduğunu ileri sürmüşlerdir. İdeal bir grafen/metal ekleminde, kontak direnci sadece grafendeki taşıyıcı modlarının sayısı ile açıklandığını vurgulamışlardır. Bununla birlikte kontak direncinin ölçülmesi henüz tam olarak net olmadığını ve kontak direncini tanımlamak için gerekli faktörlerin belirsiz bir biçimde artmakta olduğunu belirtmişlerdir. Xia *ve ark.* kontak metali olarak Pd/Au ve ölçüm metodu olarak dört nokta ve TLM metotlarını kullanmışlardır. Paladyum/grafen eklemlerinde kontak direncinin sıcaklığa bağlı olarak anormal bir durum sergilediğini ve 6K sıcaklığında paladyum kontağının kontak direncinin  $110 \pm 20 \Omega \mu\text{m}$  değerinde olduğunu rapor etmişlerdir. Bu davranışın grafende paladyum kontak altındaki taşıyıcı aktarımı olarak sonuçlanacağını ve bu aktarımın balistik bir aktarım olduğunu bildirmişlerdir. Sıcaklığın artması ile direncin arttığını, Ni kontak için kontak direncini  $500 \Omega \mu\text{m}$ , titanyum için sıvı helyum sıcaklığında kontak direncini  $250 \Omega \mu\text{m}$  ve oda sıcaklığında titanyum için kontak direncini  $1000 \Omega \mu\text{m}$  olarak belirlemişlerdir ve oda sıcaklığında kontak direncinin kapı voltajı ile değişim gösterdiğini vurgulamışlardır [23].

2011 yılında Pensilvanya Üniversitesinden J. A. Robinson *ve ark.* grafene yüksek kaliteli omik kontak oluşturmak için çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında TLM yöntemi ile Al/Au, Ti/Au, Ni/Au, Cu/Au, Pt/Au ve Pd/Au metallere kontak

dirençlerini belirlemişlerdir. Ti/Au kontağı için spesifik kontak direncini yaklaşık  $10^{-7} \Omega\text{cm}^2$  olurken, diğerk metallere için kontak direncinin benzer değerklere sahip olduğunu saptamışlardır. Ayrıca metal/grafen kontak direnci ile grafenin yüzey kirliliklerini ve yapısal kalitesi arasındaki ilişkiyi saptamak için Raman Spektroskopisi, XPS, SEM ve AFM den faydalanmışlardır [24].

K.Nagashio *ve ark.* 2011 yılında gerçekleştirdikleri bir çalışmada metal altındaki grafenin elektriksel taşınma ve Raman karakterizasyonu üzerine odaklanmışlardır. Grafenin altındaki alttabaka tarafından önemli derecede etkilenirken metal-grafen arasında zayıf bir etkileşim olduğunu saptamışlardır. Metal altındaki grafenin iletkenlik modülasyonunu ve alt tabakanın grafende Dirac noktasına etkisini incelemişler ve tartışmışlardır. Metal kontak olarak Ni kullanılmıştır. Ölçümlerinde 4-Nokta (four-probe) metodunu kullanmışlardır ve Ni için spesifik kontak direncini  $10^{-5} \Omega\text{cm}^2$  olarak belirlemişlerdir [25].

2012 yılında J. Knoch *ve ark.* Metal-Grafen kontakların özellikleri üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Çift kapılı alan etkili taransistör kullanarak kontak yapılan bölgelerde Fermi seviyesi ve Dirac noktası arasındaki enerji cinsinden aralığın, sadece kanal üzerindeki etkisi olan ön kapı voltajı tarafından ayarlanabileceğini ifade etmişlerdir. Deneysel verileri simülasyonlar ile kıyaslayarak metal-grafen arasındaki birleşim kuvvetinin hesaplanabilmesini ve paladyum kontağın doping konsantrasyonuna olan katkısının tahmin edilebilmesini sağlamışlardır. Deneysel ve simülasyon verilerini kullanarak metal grafen etkileşiminin zayıf olduğunu dolayısıyla kontaklar altındaki grafenin durum yoğunluğu modifikasyonunun gerçekleşmeyecek kadar küçük olduğunu ve buna neden olarak kapı gerilimi ile oluşan alanın ekranlanma etkisinin olmayışını ifade etmişlerdir [26].

2012 yılında K.Nagashio *ve ark.* daha önceki çalışmaları olan metal/grafen kontakların daha iyi anlaşılması için bir çalışma daha sunmuşlardır. Bu çalışmada rezistsiz ve geleneksel elektron ışını işlemlerini karşılaştırarak oluşan katkısız arayüzeyin nasıl etkilendiği konusunda bir sonuca varmaya çalışmışlardır ve kontak direncini azaltmak için gelecekteki zorluklarını tartışmışlardır. Ayrıca Grafen/SiO<sub>2</sub> arayüzey-yüzey yapısını, Ni/Grafen ara yüzeylerini incelemişlerdir. Daha sonra katkısız meta/grafen eklemlerin özelliklerini, yük transfer bölgesini,

kontakt direncini son olarak da metal/grafen/SiO<sub>2</sub> etkileşim kuvvetini incelemişlerdir. Ölçümlerinde TLM ve dört nokta ölçüm metodlarından faydalanarak kontakt direncini yaklaşık 1000Ωµm olarak belirlemişlerdir. Ölçümler neticesinde kontakt direncinin kapı voltajına bağlı olduğunu saptamışlardır [27].

E. Watanable *ve ark.* 2012 yılındaki çalışmalarında düşük dirençli omik kontaklar oluşturmak amacı ile grafene çeşitli metallere kontaklar oluşturmuşlardır. Ti, Ag, Co, Cr, Fe, Ni ve Pd metalleri kullanmışlar ve direnç ölçümleri için TLM metodundan faydalanmışlardır. Daha keskin olarak kontakt direnci değerlerini belirlemek için bu araştırmacılar tek tip arayüzey alanı ve kanal genişliği ile dikdörtgen grafen kanalları ve TLM yapısı üretmişlerdir. Ti kontakt için kontakt direnci değerinin 700±500 Ωµm olduğunu ve bu değerin daha önceki literatürlerde bulunan değerden daha küçük olduğunu bildirmişlerdir. Buna ek olarak kontakt direncinin metalin iş fonksiyonu ile oldukça ilişkili olduğunu ve metallerin mikro yapısından etkilendiğini göstermişlerdir. Metal/grafen arasında direkt kontakt oluşturmak için kimyasal temizliğin ve metal filmlerin mikro yapılarının düşük dirençli omik kontakt oluşumunda temel etkenlerden biri olduğu sonucuna varmışlardır [28].

J.S.Moon *ve ark.* yine 2012 yılında yapmış oldukları çalışmalarında 100 Ωµm kontakt direncine sahip grafen/metal omik kontakları deneysel olarak göstermişlerdir. TLM metodundan faydalanarak spesifik kontakt direncini  $3 \times 10^{-7}$  ile  $1.2 \times 10^{-8}$  Ωcm<sup>2</sup> aralığında olduğunu belirlemişlerdir. Düşük kontakt direncini kısa kanal aralığına sahip HfO<sub>2</sub>/grafen alan etkili transistörler kullanarak, 1V'luk kaynak-akaç voltajı, 1,7 A/mm yüksek akım yoğunluğunda ve 550 Ωµm R<sub>on</sub> direncinde belirlemişlerdir. Grafen alan etkili transistörlerdeki düşük omik kontakt direncini en düşük R<sub>on</sub> ve en yüksek akım yoğunluğu değerinde belirlediklerini vurgulamışlardır [29].

2012 yılında Osman Balcı ve Coşkun Kocabaş yüksek kaliteli grafen-metal kontakların yüksek performanslı grafen cihazlar için istenilen bir durum olduğunu değerlendirmişlerdir. İşlemlerle ilgili faktörlerin kontakt direncinde geniş varyasyonlarla sonuçlandığını vurgulamışlardır ve çalışmalarında grafen-metal kontakların tavlama işleminin etkilerini incelemişlerdir. Tavlama işleminin öncesinde ve sonrasında cihaz için sistematik bir sonuç oluşturmuşlardır ve tavlama



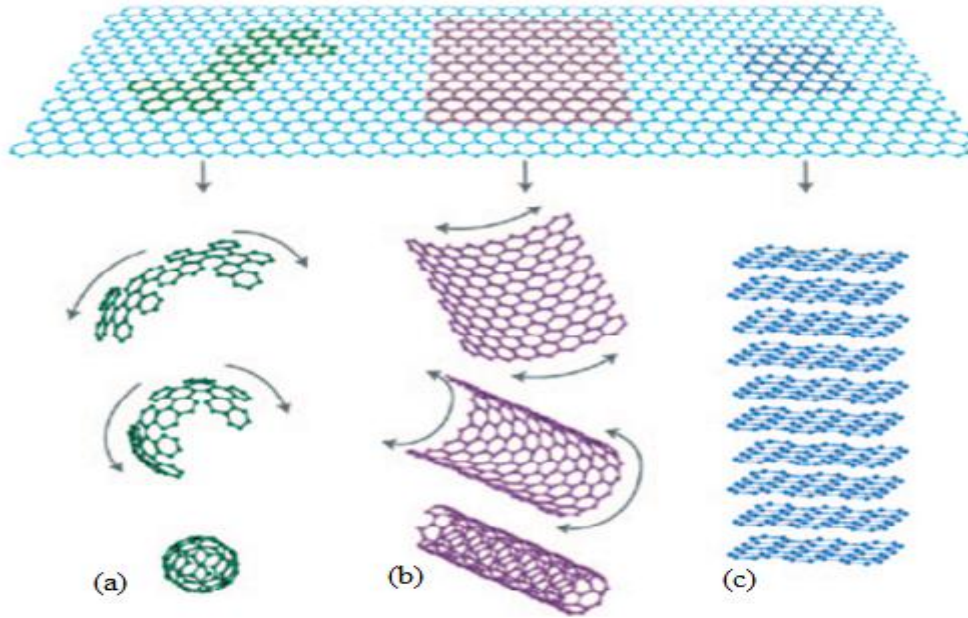
yönteminin kontak direncini düşürmek için kullanılabilir bir teknik olabileceğini göstermişlerdir. Transistörlerdeki kontak direncini ve tabaka direncini analiz etmek için TLM yöntemini ve kontak metali olarak da Cu, Ag, Au ve Pd metallerini kullanmışlardır. Ag için tavlama işlemi öncesinde ve sonrasında kontak direncinin 3,4 k $\Omega\mu\text{m}$ -1,4 k $\Omega\mu\text{m}$ , Cu için 8,8 k $\Omega\mu\text{m}$  - 2,9 k $\Omega\mu\text{m}$ , Au için 0,94 k $\Omega\mu\text{m}$  - 0,63 k $\Omega\mu\text{m}$ , Pd için 0,8 k $\Omega\mu\text{m}$  - 0,57 k $\Omega\mu\text{m}$  olarak belirlemişlerdir [30].

2012 yılında J. Anteriona *ve ark.* titanyum kontaklı Grafen Alan Etkili Transistörler ve TLM yapısı üretmişlerdir. Grafen alan etkili transistörlerden kontak direncinin nümerik olarak çıkarılabileceğini ve TLM yapıları ile ölçülebileceğini amaçlamışlardır. Araştırmalarında grafen-titanyum kontakların direncini TLM metodu ile belirlemişlerdir ve toplam direncin kapı voltajı ile değiştiğini göstermişlerdir [31].

A.Di Bartolomeo *ve ark.* 2013 yılında tek tabaka grafen ve iki tabaka grafenden üretilen back-gate uygulanmış alan etkili transistörler kullanarak kontak direnci ve transfer karakteristiği ile ilgili bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmalarında TLM yönteminden faydalanmışlardır ve kontak metali olarak da Ni ve Ti metallerini kullanmışlardır. Ni ve Ti için spesifik kontak dirençlerini sırasıyla 7 k $\Omega\mu\text{m}^2$  ve 30 k $\Omega\mu\text{m}^2$  olarak tespit etmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda kontak direncinin drain-source arasındaki toplam dirence kaydadeğer bir katkı sağladığını göstermişlerdir ve kontak direncinin kapı voltajı ile değişim gösterdiğini vurgulamışlardır [32].

## 2. GRAFEN VE ÖZELLİKLERİ

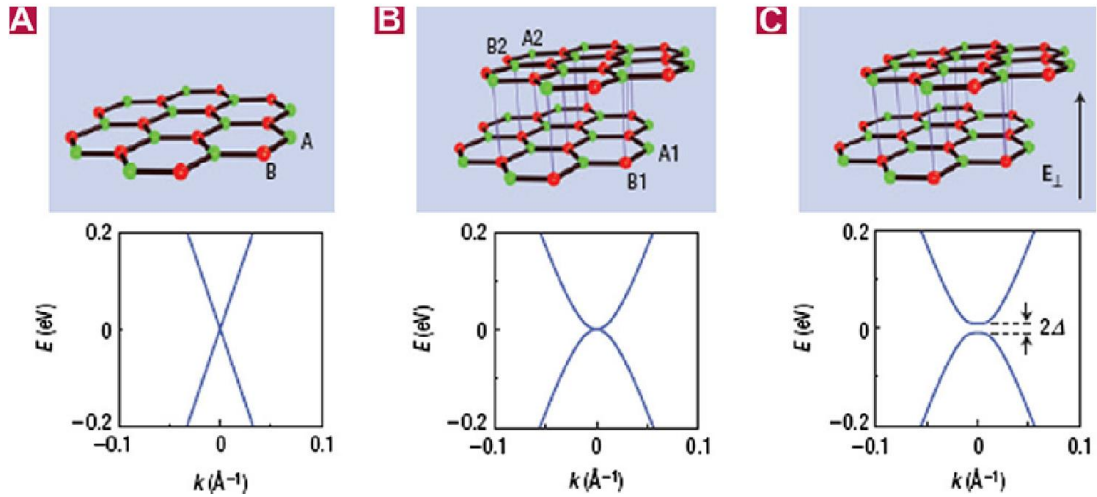
Grafen son yıllardaki en önemli araştırma konularından biridir ve Şekil 2.1’de gösterildiği gibi grafitin bir formudur [1]. Bu iki boyutlu malzeme karbon atomlarının hegzagonal yapıda dizilmesi ile oluşmaktadır. Grafen, karbon nanotüp ve fullerenden oldukça farklı özellikler göstermektedir. Oda sıcaklığında Kuantum Hall Etkisi [2-4], yük taşıyıcılarını balistik iletimi, ambipolar elektrik alan etkisi [5], ayarlanabilir band aralığı [6] ve yüksek elastikiyeti [7] grafenin tipik özelliklerindedir. Bunun yanında tek tabaka grafen beyaz ışığın yalnızca %2,3’ünü absorbe etmektedir [33] Grafenin oldukça düz olduğu beklenmesine rağmen termal durumlardan dolayı yapısında dalgalanmalar bulunmaktadır [1]. İdeal bir grafen tek tabakalı bir malzemedir fakat iki veya daha fazla tabakalı grafenlerde aynı ilgiyi görmektedir. Grafen üç farklı çeşitte tanımlanır. Bunlar tek tabakalı grafen (SG), iki tabakalı grafen (BG), bir kaç katmanlı grafen (FG) dir. İlk tek tabakalı ve iki tabakalı grafen mekanik ayırma yöntemi ile elde edilmektedir [5], fakat grafenin sentezi için birkaç yöntem daha sonra geliştirilmiştir [8].



Şekil 2.1. (a) Karbon Nanotüp(CNT), (b) Fulleren, (c) Grafen’ in görüntüsü [31]

## 2.1. Grafenin Elektriksel Özellikleri

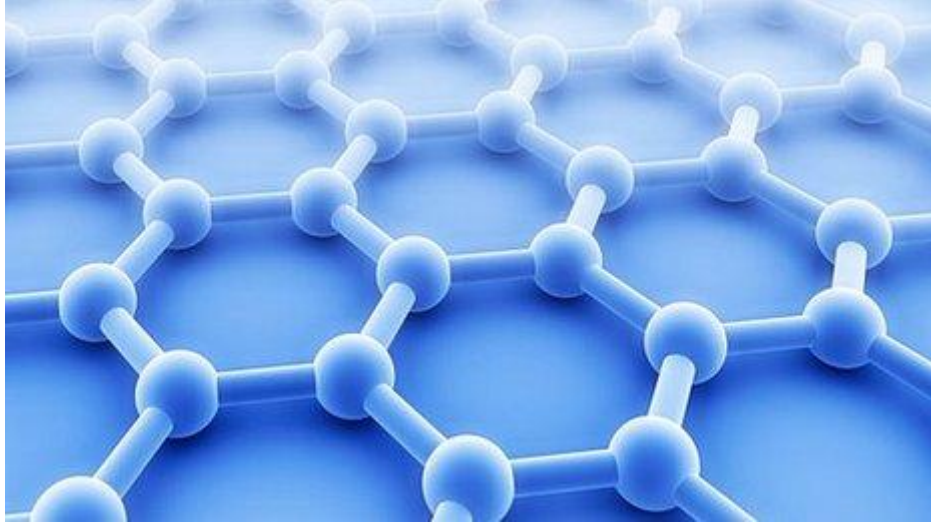
Grafenin üç boyutlu malzemelerden farklı özelliklere sahiptir. Grafen bir yarı-metal ya da yasak enerji aralığı olmayan bir yarıiletken olarak değerlendirilmektedir.. Grafenin elektriksel özelliklerini anlamak için ilk etapta grafenin bant yapısının bilinmesi gerekmektedir. P.R.Wallace henüz 1947 yılında yaptığı bir çalışmada [34] grafenin iki boyutlu hegzagonal Brillouin bölgelerinin altı köşesinin yakınlarındaki noktalarda düşük enerjiler için enerji-momentum ilişkisini lineer olduğunu ve bu bölgelerdeki elektron ve holler için etkin kütlelerin sıfır olduğunu ifade etmişlerdir [35]. Şekil 2.2 de Grafenin Tek Tabaka, İki Tabaka Olduğu Durumdaki Enerji Aralığı ve Elektrik Alan Uygulanması Durumunda İki Tabakalı Grafenin Enerji Aralığı Gösterilmektedir [36].



**Şekil 2.2.** Grafenin (A) Tek Tabaka, (B) İki Tabaka Olduğu Durumdaki Enerji Aralığı, (C) Elektrik Alan Uygulanması Durumunda İki Tabakalı Grafenin Enerji Aralığı Gösterimi [33]

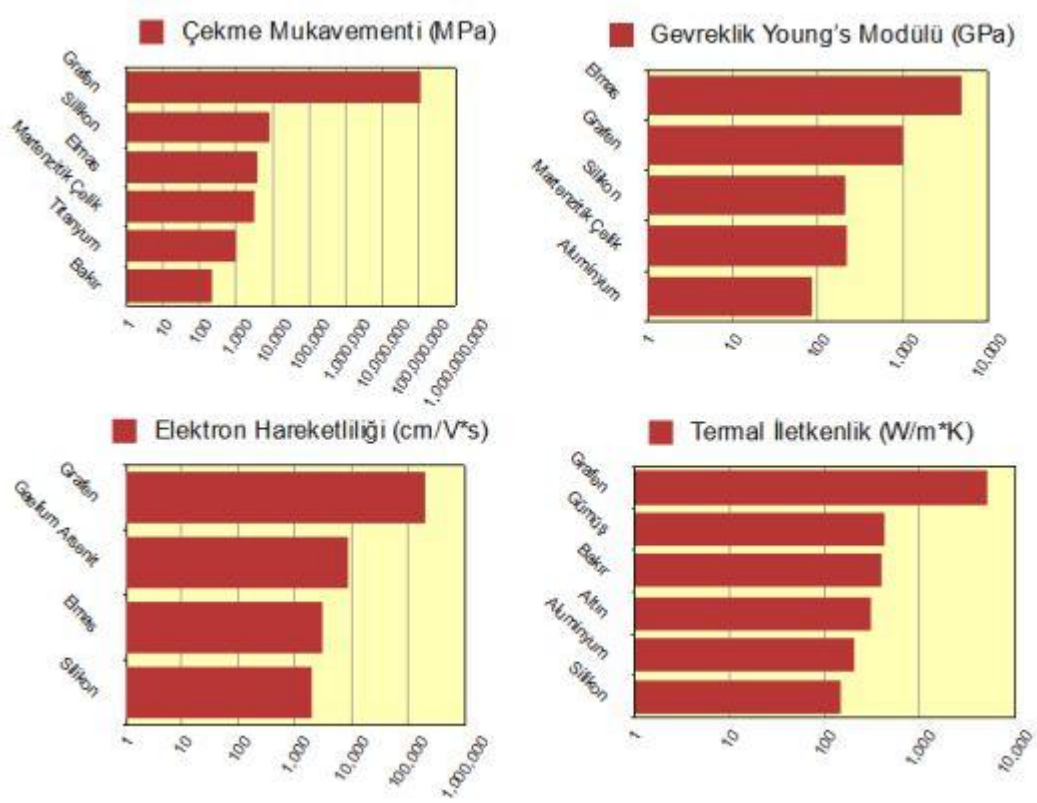
Düşük sıcaklıklardaki lineer ayrılmalardan dolayı bu altı nokta yakınlarındaki elektronlar ve holler, spinleri  $\frac{1}{2}$  olan parçacıklar için Dirac eşitliği ile tanımlanan relativistik parçacıklar gibi davranırlar [35,36]. Bu sebeple elektronlar ve holler Dirac Fermiyonları olarak adlandırılırlar ve Brillouin bölgesinin altı köşesi de Dirac noktası olarak adlandırılır [35]. Grafendeki lineer ayrılmalar  $E = \frac{\hbar}{2\pi} V_f \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$

ile verilir. Burada  $V_f$  Fermi hızı ( $\sim 10^6$  m/s) ve  $k$  dalga vektörüdür.



**Şekil 2.3.** Grafenin hegzagonal yapısının temsili gösterimi

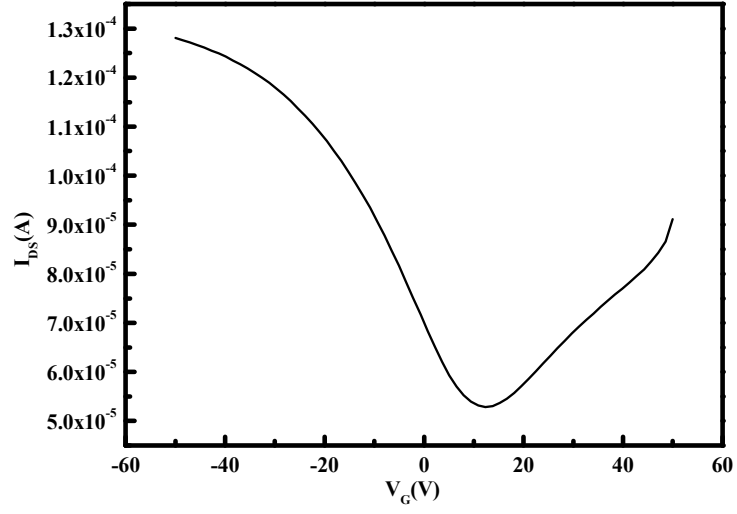
Grafenin hegzagonal yapısı temsili olarak Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar, grafenin oda sıcaklığında oldukça yüksek mobilitelere sahip olduğunu göstermektedir [37]. Buna ek olarak deneysel olarak ölçülen elektron ve hol mobilitelerinde birbirine yakın değerler göstermektedir [35]. 10 K ile 100 K arasındaki sıcaklık değerlerinde mobiliteler sıcaklıktan bağımsızdır [38-40]. Bu da baskın saçılma mekanizmasının bir kusur saçılması olduğunu göstermektedir. Grafende akustik fononlar tarafından oluşturulan saçılmalar oda sıcaklığında belirli sınıra sahiptir. Bu sınır  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  taşıyıcı yoğunluğunda mobilitenin  $200.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  gibi yüksek bir değer ortaya koymasındadır [40,41]. Bu esnada grafen tabaka direnci ise  $10^{-6} \Omega\text{cm}$  değerindedir. Bu değer gümüşünkünden daha düşüktür ve oda sıcaklığında bilinen en düşük değerdir [42]. Bununla birlikte  $\text{SiO}_2$  tabakalar üzerindeki grafen için oda sıcaklığında alttaşın optik fononları tarafından oluşan elektron saçılması, grafenin kendi fononları tarafından oluşan saçılmadan daha büyük etkiye sahiptir. Bu da mobiliteleri  $40.000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  gibi bir değerde sınırlamaktadır [40]. Grafenin bazı özelliklerinin bilinen diğer malzemeler ile karşılaştırılması Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Grafenin Çeşitli Özelliklerinin Bilinen Diğer Malzemeler İle Karşılaştırılması [43]

Dirac noktasındaki sıfır taşıyıcı yoğunluğuna rağmen grafen, yaklaşık  $4e^2/h$  kadar minimum iletkenlik sergiler. Bu minimum iletkenliğin sebebi henüz net olmamakla birlikte grafen tabakaların dalgalanması ya da  $SiO_2$  tabakasındaki iyonize safsızlıkların doğal taşıyıcı göletleri oluşturması öngörülmektedir [34]. Bununla birlikte birçok teori iletkenliğin  $4e^2/\pi h$  değerinde olması gerektiğini önermektedir. Ancak birçok ölçümde iletkenliğin  $4e^2/h$  ya da daha büyük değerde olduğunu görülmektedir [31,44].

Grafen, hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletken özelliği gösterebilmektedir. Buradan grafenin her iki yük taşıyıcısını da içeren bir madde olduğu anlaşılmıştır. Bu yük taşıyıcıları dışarıdan uygulanan kapı gerilimiyle kontrol edilebilmektedir. Madde içindeki elektronların (yük taşıyıcılarının) yönetilebilmesi modern elektroniğin kalbi olduğu için grafenin silisyum tabanlı yarı iletken teknolojisinin yerine geçmesi umut edilmekte ve istenilmektedir [45].



**Şekil 2.5.** Kaynak-Akaç Akımının Kapı Gerilimi İle Değişimi

Grafenin iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklık düşürüldükçe kapı geriliminin etkisinin daha büyük olduğu görülmüştür. Çok tabakalı grafenlerde 300 K sıcaklıklarda mobilite  $15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  iken, 4 K sıcaklıklarda mobilitenin  $60000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olduğu gözlenmiştir [45,46].

İki boyutlu olmasından dolayı grafende yük ayrılmalarının olduğu düşünülmektedir [47]. Bu yüzden grafen anyonik devreler [48] kullanılarak Kuantum bilgisayarların [49] kullanımında uygun bir malzeme olabilir. Elektronların içerisinde kolayca hareket edebiliyor olması grafeni entegre devreler için ciddi bir alternatif malzeme haline getirir. IBM araştırmacıları 2011 yılında ilk grafenli transistörü üretmeyi başarmışlardır. Grafenin kullanımı ile daha hızlı bilgisayarlar üretmek mümkün olabilecektir.

## 2.2. Metal-Grafen Kontakların Özellikleri

Grafenin sahip olduğu mükemmel elektron taşıma özelliği ve standart yöntemler ile desenlenebilmesinden dolayı gelecek nano elektroniği için alternatif malzeme olarak üzerindeki ilgi artmaktadır [45,50-53]. Son zamanlarda birçok deneysel ve teorik çalışma ile metal/grafen kontakların yapısı incelenmiş ve konu üzerindeki fiziksel mekanizma aydınlatılmaya çalışılmıştır [6-9]. Grafenle yüksek performanslı cihazlar

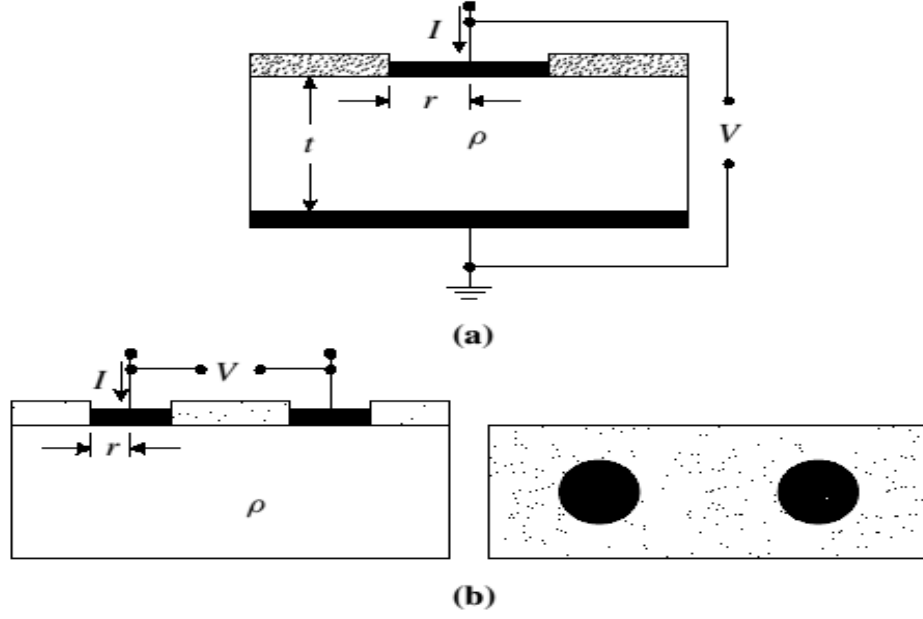
üretebilmek için yeterli ve yüksek iletkenliğe sahip metal-grafen kontaklar oluşturmak çok önemlidir. Metal-yarıiletken kontakların elektronik cihazlarda performans üzerine etkisi, iletim/ valans bandı ve metal yarıiletken arasındaki kaplama gücü yönünden fermi seviyesinin konumu ile karakterize edilebilir [54-58]. Örneğin son çalışmalar [10-14,31,34,39] grafen üzerine yapışan alkali atomların valans elektronlarını kolayca serbest bıraktıklarını ve grafenin n tipi katkılanması için iyi bir rol oynadığını göstermiştir. Alkali metal yapışmasına ek olarak araştırmalar grafen üzerine yapılan metal kaplamaları ile ilgilenmişlerdir [40-52,56]. Fakat kaplamanın fermi seviyesinin konumuna olan etkisini elde etmek zordur. Eğer fermi seviyesini enerjisi yarıiletkenin valans ve iletim bandının arasında ise ara yüzeyde bir Schottky bariyeri mevcuttur ve eğer Fermi seviyesi valans bandından daha düşük ya da iletim bandından daha yüksek seviyede ise kontakın omik olduğu söylenir. Grafene metal kontaklar yapıldığı zaman metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak fermi seviyesi etkilenmektedir. Bu yüzden farklı iş fonksiyonlarına sahip metaller kullanılarak kontakların etkisi kolayca değiştirilebilir [59]. Ayrıca rezist temizleme işlemi esnasında oksijen plazma yönteminin kullanılması ile numune üzerindeki kirlilikler daha iyi temizlenerek metallerin malzemeye daha iyi yapışması sağlanmaktadır ve bu sayede yapışan metaller grafende daha yüksek iletim ve düşük direnç oluşumuna olanak sağlanmıştır [60].

### **2.3. Kontak Direnci Ölçüm Teknikleri**

Kontak direnci ölçüm teknikleri dört ana gruptan oluşmaktadır. Bunlar; 2 Kontak, TLM, 4 Kontak ve 6 Kontak metotlarıdır. Bu metotların her biri spesifik ara yüzey direncinin ve spesifik kontak direncinin belirlenmesinde kullanılabilir.

#### **2.3.1. 2-Nokta Metodu**

2 Kontak direnç ölçüm metodu kontak direnci ölçüm metotlarının ilkidir [61]. En basit uygulaması Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. (a) Yatay, (b) Dikey 2-Nokta Kontak Ölçüm Şeması

İki kontaklı,  $R$  dirençli ve  $t$  kalınlıklı homojen bir yarıiletken Şekil 2.6 (a)'da gösterilmektedir. Burada toplam direnç

$$R_T = R_c + R_{sp} + R_{cb} + R_p \quad (2.1a)$$

Şekil 2.6(b)'de her iki kontak yüzey üzerinde olduğu için,

$$R_T = 2R_c + 2R_{sp} + R_p \quad (2.1b)$$

Burada  $R_c$  kontak direncidir.  $R_{sp}$  yarıiletkende kontak altındaki yayılma direncidir.  $R_{cb}$  alt kontakın kontak direnci,  $R_p$  ise prob direncidir. Alt kontak genellikle küçük dirençlerin bir araya gelmesi ile geniş bir kontak alanına sahiptir. Dolayısıyla  $R_{cb}$  genellikle ihmal edilebilir. Benzer şekilde prob direncide ihmal edilebilir.

$\rho$  öz dirençli bir düzlemin yayılma direnci aşağıdaki denklemden elde edilir [63].

$$R_{sp} = \frac{\rho}{2\pi r} \arctan\left(\frac{2t}{r}\right) \quad (2.2)$$

olur. Burada  $t$  yarıiletkenin kalınlığıdır. Yayılma direnci için daha uygun bir yaklaşım elde edilmiştir [46].  $2t \gg r$  için yukarıdaki denklem şu şekilde olur;



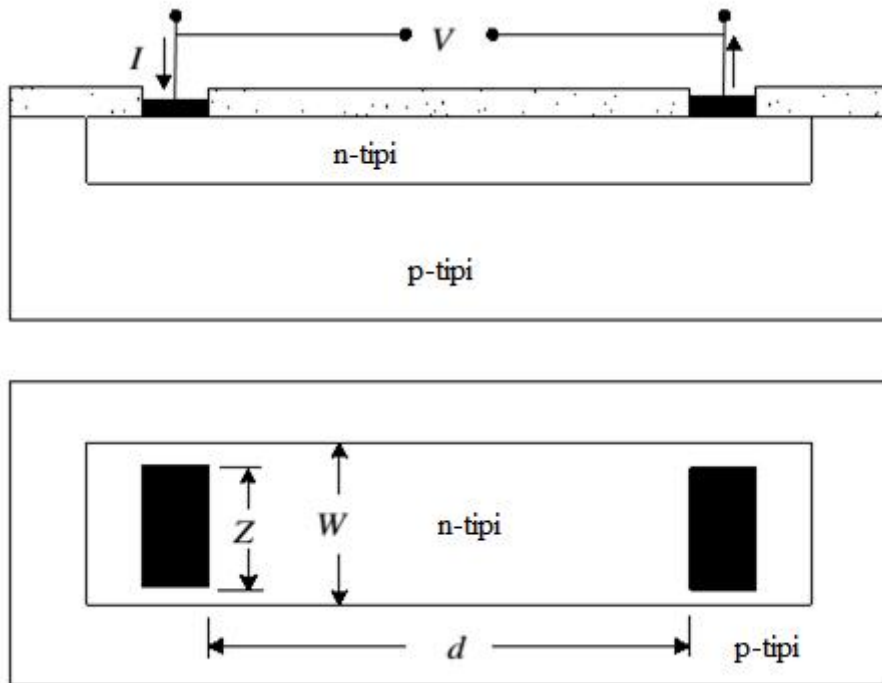
$$R_{sp} = C \frac{\rho}{4r} \quad (2.3)$$

Burada  $C$  doğrulama faktörüdür ve  $\rho, r$  ve akım dağılımına bağlıdır. Şekil 2.6(b) deki yapıda olduğu gibi geniş bir şekilde ayrılmış kontaklar için doğrulama faktörü 1 kabul edilir. Üst kontak için dikey akım geçişi sayesinde kontak direnci aşağıdaki gibi olur.

$$R_c = \frac{\rho_c}{A_c} = \frac{\rho_c}{\pi r^2} \quad (2.4)$$

Küçük  $R_{cb}$  değerleri için 2.1 denklemi, toplam direnç ve yayılma direnci arasında fark olduğunu göstermektedir. Yayılma direnci bağımsız olarak ölçülemez ve  $R_{cb}$  deki küçük hatalar  $R_c$  de büyük hatalara yol açabilir. 2 Nokta metodu  $R_{sp} \ll R_c$  durumunda en iyi sonucu vermektedir [62,64-67].

2 Nokta kontak direnci ölçüm metodunun diğer bir farkı da çeşitli boyutlarda kontaktların kullanılmasıdır. 2.1 denklemi kullanılarak  $R_c$  ölçülebilir ve  $\rho_c$  belirlenebilir [68].



Şekil 2.7. Dikey 2-Kontak Ölçüm Şemasının Yandan ve Üstten Görüntüsü

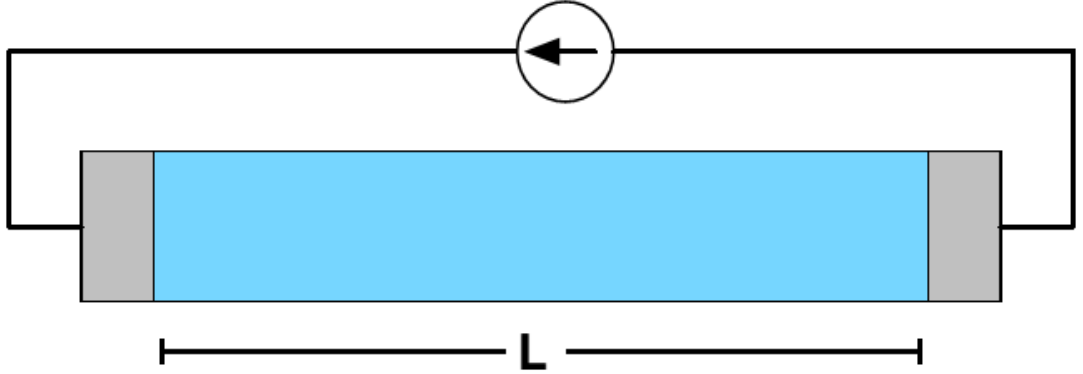
2 Nokta kontak direnci ölçüm metodu Şekil 2.7 deki gibi yanal yapılar için daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Test yapısı aralarında  $d$  kadarlık bir mesafe bulunan iki kontak oluşmaktadır. Yanal akım geçişinden dolayı bu sistemi analiz etmek daha zordur. Buna kullanılan numunenin sahip olduğu geometrik yapı da dâhildir [69]. Şekil 2.7 deki yapı için toplam direnç aşağıdaki gibidir.

$$R_T = \frac{R_{sh}d}{W} + R_d + R_w + 2R_c \quad (2.5)$$

Burada  $R_{sh}$  yarıiletkenin direnci,  $R_d$  kontak altındaki akım geçişinin neden olduğu direnç,  $R_w$  kontak direnci korelasyonu ve  $R_c$  her iki kontak için özdeş kabul edilen kontak direncidir. Her hangi iki kontak arasındaki toplam direnç, yarıiletken direnci, kontak direnci ve metal direncinin toplamına eşittir. Yarıiletken direnci tabaka direncinin belirlenmesi ile elde edilir. Yarıiletken direncinin toplam dirençten çıkarılması ile de toplam kontak direnci bulunur [70].

### 2.3.2. TLM (Transfer Length Measurement) Metodu

Transistör ve diğer elektronik cihazların en yüksek verimle çalışabilmesi uygun omik kontaklarla mümkündür. Bu sebeple kontak direncinin belirlenmesi önemlidir.



Şekil 2.8. Direnç Ölçüm Şeması

Yukarıda gösterildiği gibi örnek bir direnç geometrisi düşünün. Çubuğun her iki ucunada iki kontak yerleştirilmiştir ve her biri  $A_C$  kadarlık bir kontak alanına sahiptir. Bu iki uç arasından ölçülen toplam direnç birkaç bileşenden oluşmaktadır [71].

$$R_T = 2R_m + 2R_c + R_{sh} \quad (2.6)$$

$R_m$ , Kontak metali nedeni ile oluşan dirençtir.

Birçok durumda kontaktaki metalin öz direnci ( $R_c \gg R_m$ ) çok düşüktür. Bu yüzden  $R_m$  ihmal edilebilir.

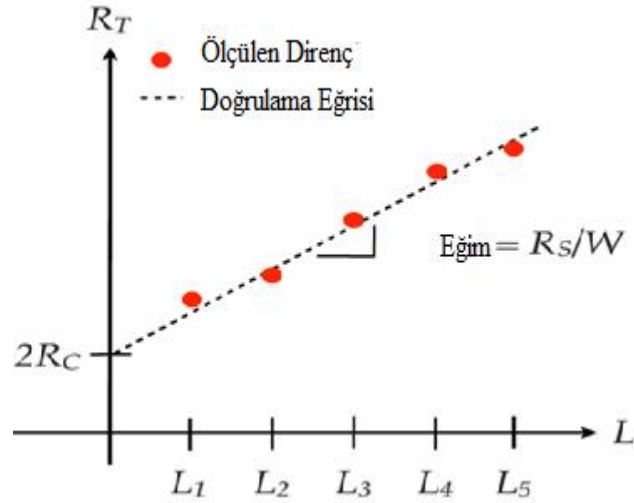
Yarıiletken direnci için;

$$R_{sh} = R_s L/W \quad (2.7)$$

$$R_T = R_s L/W + 2R_c \quad (2.8)$$

olur. Burada  $R_s$  tabaka direncidir. Bu sonuçlar kontak direncinin ölçülebilmesi için bir metod sunmaktadır. Eğer birkaç farklı genişlikte dirençler oluşturulmuşsa, diğer detayların aynı olduğunu düşünerek her biri için toplam direnç ölçülebilir ve ardından toplam direncin kontaklar arası mesafeye karşı grafiği çizildiğinde kontak direnci, tabaka direnci, spesifik kontak direnci ve transfer boyu belirlenebilir.

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi  $L=0$  için eğrinin y eksenini kestiği nokta kontak direncini belirlememizi sağlar.

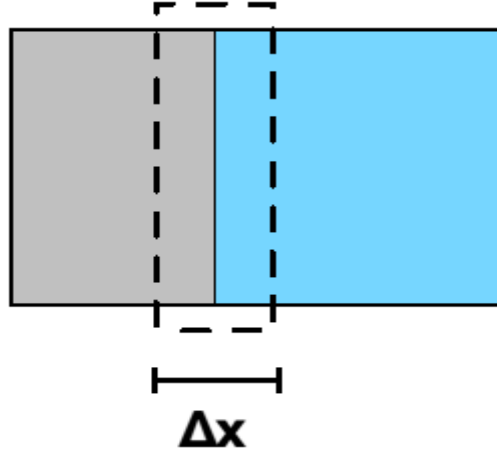


Şekil 2.9. TLM ölçüm grafiği

Yarıiletkenin tabaka direnci grafikte gösterildiği gibi doğrunun eğiminden bulunabilir. Kontak direnci, kontak alanına bağlıdır. Bu yüzden kontak direnci iyi bir

kıyaslama parametresi olmayabilir ve bunun yerine kontak öz direnci kullanılabilir [72].

Kontak çevresinde küçük bir bölge düşünülürse;



Şekil 2.10. Metal/Yarıiletken Kontakın Şematik Gösterimi

$$R_c = \rho' \frac{\Delta x}{A_c} \quad (2.9)$$

Kontak öz direnci ise,

$$\rho_c = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (\rho' \Delta x) = R_c A_c \quad (2.10)$$

denklemleri ile verilir. Kontak öz direncinin birimi  $\Omega\text{cm}^2$  dir. Üretilen kontaklarda bu değer  $10^{-3}$  den  $10^{-8} \Omega\text{cm}^2$  ye kadar değişmektedir.

Geometri gösterimini kullanarak birkaç farklı genişlikteki direnç değerlerinin ölçülmesi ile kontak öz direncini bulmak mümkündür ve kontak alanlarının da bilinmesi ile diğer parametrelerin belirlenmesi sağlanabilir. Bununla birlikte yarıiletken boyunca olan akım akışı düzenli değildir, fakat kontak içindeki akış düzenlidir. Kontak alanını belirlemek için kontak fiziksel genişliği ve boyu kullanılabilir. Ayrıca kontak yakınlarındaki akım akışı önemlidir. Kontakın köşesinden uzak olan köşeye doğru akım azalır ve yok olur. Buna akım yüklenme denir. Bu bölgedeki akım aşağıdaki gibi değişmektedir.

$$I(x) \propto \exp\left(-\frac{x}{L_T}\right) \quad (2.11)$$

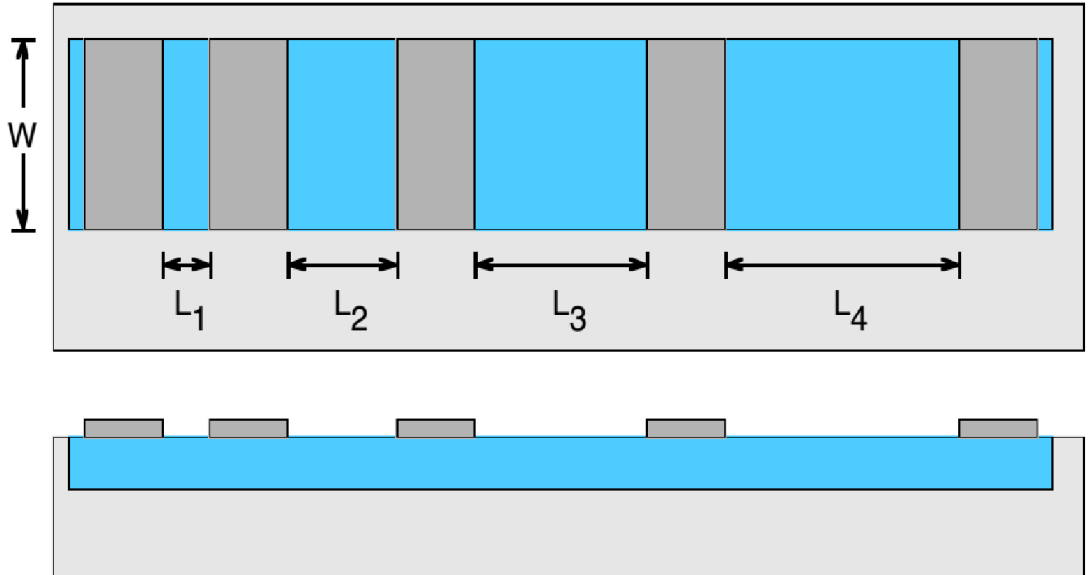
$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_s}} \quad (2.12)$$

Transfer boyu ( $L_T$ ), yarıiletkende kontak altındaki bir elektron ya da holün kontak içinde hareket etmeden önceki ortalama hareket mesafesidir. Bu sebeple kontakın etkin alanı  $L_T W$  olarak kabul edilebilir. Bu işlemler sonucunda kontak direnci;

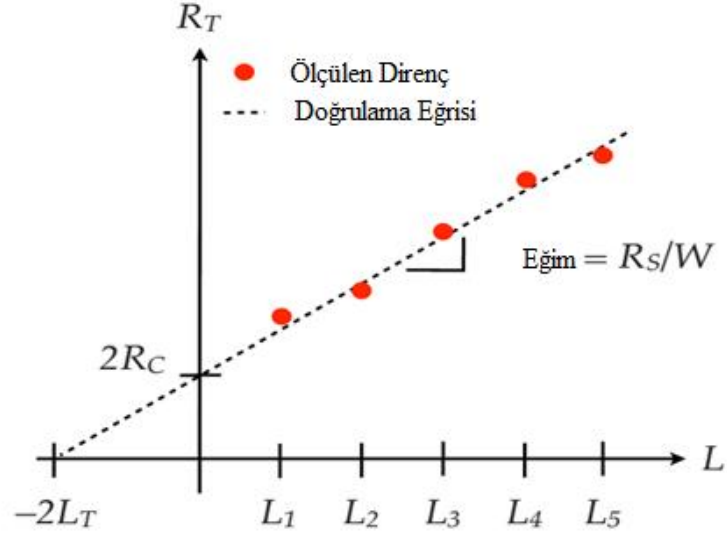
$$R_c = \frac{\rho_c}{L_T W} \quad (2.13)$$

$$R_T = R_{sh} + 2R_c = R_s \frac{L}{W} + 2 \frac{\rho_c}{L_T W} = R_s \frac{L}{W} + 2 \frac{R_s L_T}{W} = \frac{R_s}{W} [L + 2L_T] \quad (2.14)$$

TLM test modeli için oluşturulmuş bir örnek aşağıda verilmiştir. Burada farklı kontak alanlarına sahip birkaç bölge bulunmaktadır. Bu bölgeler sayesinde farklı direnç değerleri ve bu sayede istenen ya da gereken parametreler bulunabilir. Şekil 2.11'de TLM test şeması ve Şekil 2.12'de ise TLM ölçüm grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.11. TLM test şeması

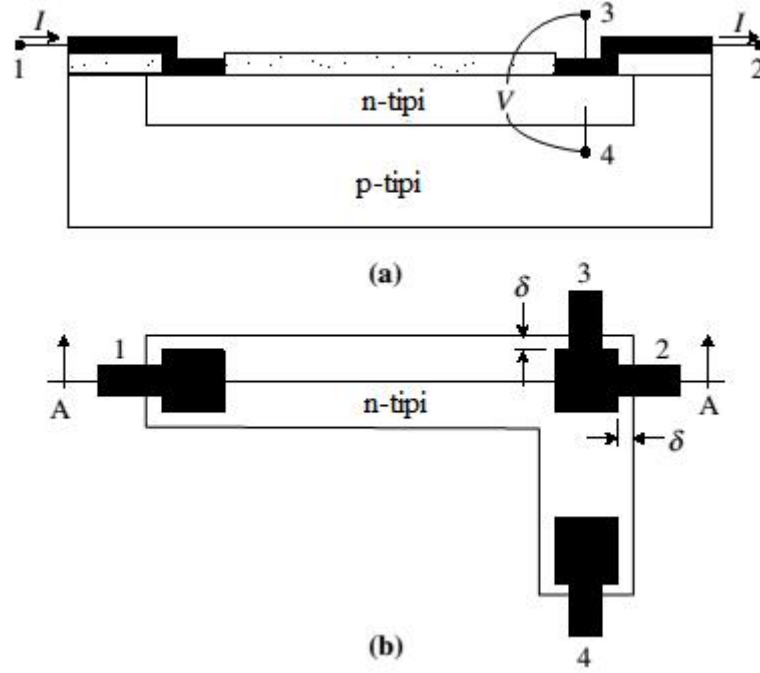


Şekil 2.12. TLM ölçüm grafiği

Toplam dirence karşı kontak genişliği grafiği aynı zamanda transfer uzunluğu parametresini bulmamıza yardımcı olur. Yukarıdaki grafikte gösterildiği gibi farklı boyutlarda ölçülen direnç değerleri üzerinden çizilen lineer eğri sayesinde istenilen parametrelerin bulunmasına imkân sağlamaktadır [73].

### 2.3.3. 4-Nokta Metodu

Spesifik kontak direnci ölçüm tekniklerinde yarıiletkenin bulk direnci ya da yarıiletkenin tabaka direncinin bilinmesi gerektiği tartışılmaktadır. Bununla birlikte  $R_c$  ve  $\rho_c$  nin veya mümkünse tabaka direnci ve bulk direncinin katkısının belirlenmesi istenen bir durumdur. Bu yöntem 4 Nokta kontak direnci ölçüm metodu ya da Cross-Bridge Kelvin (CBKR) metodu denilmektedir. Bu yöntem ilk olarak 1972 yılında metal-yarıiletken kontakların kullanılması için bulunmuştur fakat 1980'lerde uygulamaya başlanmıştır [74-76]. Prensip olarak bu yöntem kontak metalinin ya da yarıiletkenin bir etkisi olmadan spesifik kontak direncinin ölçülmesine olanak sağlamıştır.



**Şekil 2.13.** 4-Nokta Direnç Ölçüm Şemasının (a) Yanal, (b) Dikey Görüntüsü

Yapısal olarak Şekil 2.13’de gösterilen bu yöntemde 1. ve 2. Kontaklar arasından akım verilir ve 3-4. kollar arasından da gerilim ölçülmektedir. 1. ve 2. kollar arasında 3 adet voltaj düşmesi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi 1. kol ile yarıiletken arasında, ikincisi yarıiletken boyunca ve üçüncüsü ise yarıiletken ve 2. kol arasındadır.

Kontak direnci basit olarak aşağıdaki gibidir.

$$R_c = \frac{V_{34}}{I} \quad (2.15)$$

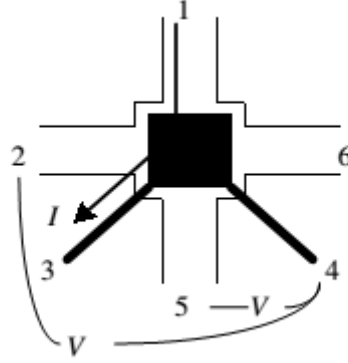
Spesifik kontak direncide aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$\rho_c = R_c A_c \quad (2.16)$$

Fakat denklem 2.16 deneysel verilerle her zaman uyumlu değildir.

#### 2.3.4. 6-Nokta Metodu

Şekil 2.14 de gösterilen bu yapı 4 nokta Kelvin yapısına benzerdir ve ek olarak iki kontak daha kullanılmıştır [75]. Bu yöntem sayesinde kontak direnci, spesifik kontak direnci ve tabaka direnci belirlenmektedir.



Şekil 2.14. 6-Nokta Direnç Ölçüm Şeması

Geleneksel Kelvin yapısında akım Şekil 2.14 de gösterildiği gibi 1. ve 2. kontaklar arasından verilirken voltaj 3. ve 4. kontaklar arasından ölçülmektedir. Tek boyutlu durumlar için denklem 2.15 ve 2.16'ın analiz edilmesi ile sonuca ulaşılabılır. Fakat iki boyutlu komplikasyonlarının tümü bu denklemler ile analiz edilemez. Bunun için 6 Nokta yöntemi kullanılır. Bu yöntemde kontak direncini ölçmek için akım 1. ve 3. kontaklar arasından verilir ve 5. ve 6. kontaklar arasından voltaj ölçülür. Daha sonra aynı 4 Nokta yöntemindeki gibi spesifik kontak direnci ve tabaka direnci hesaplanır.



### 3. GRAFENİN SENTEZLENMESİ VE YÖNTEMLER

Bu bölümde sırasıyla grafenin sentezlenmesinden, grafenin Raman spektrumundan, Litografi işleminden ve Termal buharlaştırma işleminden bahsedilecektir.

#### 3.1. Grafenin sentezlenmesi

Grafen yaygın olarak şu yöntemler ile elde edilmekte:

1. Kaydırma Yöntemi
2. Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi
3. Silisyum-Karbon Üzerinde Epitaksiyel Büyütme Yöntemi
4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

Aşağıda bu yöntemler gerektiği detayda ifade edilmektedir.

##### 3.1.1. Kaydırma Yöntemi

Kaydırma yöntemi, yüksek derecede yönlendirilmiş pilitik grafitin (HOPG) mikro mekaniksel olarak ayrışmasıdır. Bu metot da grafit tabakaları Scotch band ile devamlı olarak çekilip ayrılarak daha ince grafen tabakaları elde etmek amaçlanmaktadır.



**Şekil 3.1.** Kaydırma Yönteminde Kullanılan Malzemelerin Görüntüsü

Üretilen birkaç tabaka grafen tabakası daha sonra silisyum Wafer üzerine aktarılır [7]. Bu yöntem Noveselov *ve ark.* tarafından bulunmuştur ve Grafenin eşsiz özelliklerini keşfedebilmek için bir kapı açmıştır. Bu yöntem ile 100 mikrometre büyüklükte grafen parçacıkları fiziksel olarak sentezlenebilmektedir.

### 3.1.2. Kimyasal Ayrıştırma Yöntemi

Grafenin sentezlenmesi ile ilgili diğer bir yöntemde Kimyasal Ayrıştırma Yöntemidir [77]. Bu yöntemde grafitten grafen oksit (GO) oluşturmak için güçlü asitler ve oksidanlar kullanılmaktadır. Grafen Oksitler tekli grafit tabakaları arasına bağlı oksijen ve hidroksil grupları içermektedir. Bu da grafen ara tabakalarını hidrofilik yapar ve su molekülleri sayesinde kolayca ayrışması sağlanmaktadır. Grafen Oksitlerin ayrışması hidrozin gibi organik indirgeyiciler tarafından gerçekleştirilmektedir.

### 3.1.3. Silisyum-Karbon Üzerinde Epitaksiyel Büyütme Yöntemi

Grafenin Epitaksiyel Büyütme Yöntemi ile sentezlenmesi SiC'nin termal olarak analizi ile elde edilmektedir. Berger ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [78] yüksek vakum durumunda ve 1250-1450 °C sıcaklık değerleri arasında 6H-SiC tek kristalinin yüzeyinde büyütülen birkaç tabaka grafitin 1100 cm<sup>2</sup>/Vs elektron mobilitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bu değer bazı elektronik uygulamalar için kabul edilebilir değerdir. Lee ve ark. [79] buna benzer bir metod kullanarak Si alttabakalı SiC üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüş grafen transfer etmişlerdir. Fakat bu metod ile mikron altı boyutta grafen tabakalarının ayrılmasının ve transfer edilebilir grafen limitinin sınırladığını açıklamışlardır. Diğer bir grubun yapmış olduğu çalışmada [80] grafen yüzey üzerine altını yapışmasını zayıf olduğunu, transfer edilen grafende birçok hasar meydana geldiğini ve mobilitenin yaklaşık 100 cm<sup>2</sup>/Vs olduğunu vurgulamışlardır. Oluşan bu hasarların grafenin metal yüzey üzerinden ayrılması esnasında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

### 3.1.4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

Grafenin kimyasal buhar biriktirme, büyük alanlı birkaç tabaka grafen üretmek için kolay ve kontrol edilebilir bir büyütme yöntemi olmuştur. Ayrıca bu yöntem karbon nanotüpler [81] ve çeşitli nano maddelerin [82] üretilmesinde çok kullanılan bir yöntemdir. Kimyasal buhar biriktirme tekniğindeki temel mekanizma yüksek sıcaklıklarda bir hidrokarbon gazına maruz bırakıldıktan sonra geçiş metali üzerinde karbonun doyuma ulaşmasıyla grafen eldesine dayanmaktadır. Bu yöntemle genellikle nikel filmler metan gazıyla birlikte kullanılmaktadır. Bundan başka Cu,

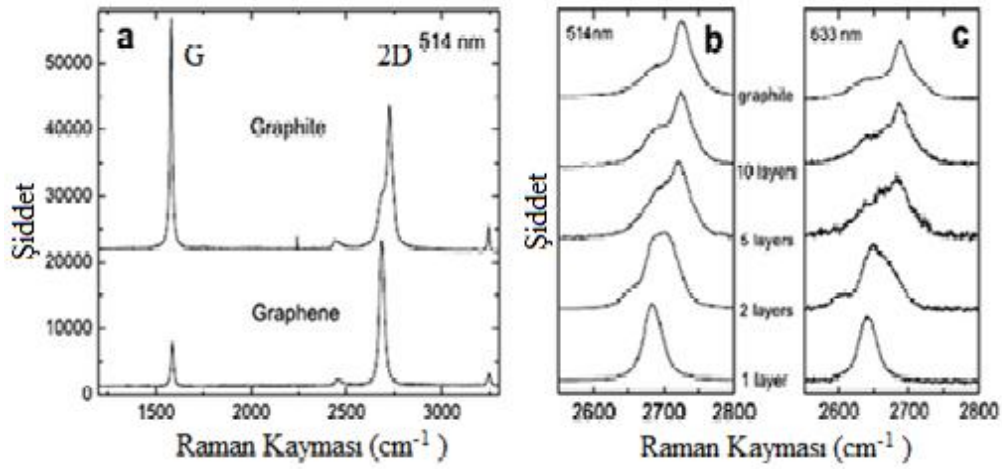
Co, Pt, Ir gibi geçiş metalleri ile birlikte H<sub>2</sub> (hidrojen) ve C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (etil alkol) gibi gazlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu gaz molekülleri katilazör yüzey üzerine karbonun yeniden oluşmasında etkili olmaktadır. Ayrıca katalizörler, büyütme süreci boyunca karbon atomları 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 [83] ve çökeltme [84] süreci iken, buna karşın bakır üzerine grafen büyütme, yüzey adsorpsiyonuna dayanan bir süreç olmuştur [85].

Nikel ile 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 ayrılıp ve 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 çok rahat olmuştur. Nikel filimlerin karbon çözünürlüğü bakıra göre çok daha yüksektir. Tek tabaka grafen üretimindeki bu gelişme ise grafen temelli makro elektroniği 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 [86].

### **3.2 Grafenin Raman Spektrumu**

Karbon allotropları Raman spektroskopisinde elektron bantlarındaki yük değişikliğinden dolayı D,G ve 2D pikleri tarafından 1350 cm<sup>-1</sup>, 1580 cm<sup>-1</sup> ve 2700 cm<sup>-1</sup> aralığında kendisini göstermektedir. Bu özelliklerinden dolayı grafit tabakalarının katman sayılarını, doping konsantrasyonunu, sıcaklık ve kusurların malzeme üzerindeki etkisini anlamamızda olanak sağlar. 2D bandı D bandının

frekans olarak iki katı olurken ve ikinci dereceden Raman saçılma işlemi oluşurken, G bandı Brillouin bölgesi merkezinde çift dejenere fonon modu ile ilişkilidir.  $1580\text{ cm}^{-1}$  civarındaki bu band nedeniyle  $sp^2$  karbon atomlarının düzlemsel titreşimi ortaya çıkmaktadır. D bandı grafenin atomik yapısındaki düzensizliklerden, dalgalanmalardan ve yük birikintilerinden meydana gelmektedir. Grafit ile tek tabaka veya birkaç tabaka grafenin Raman spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 3.2’de gösterilmiştir [87].

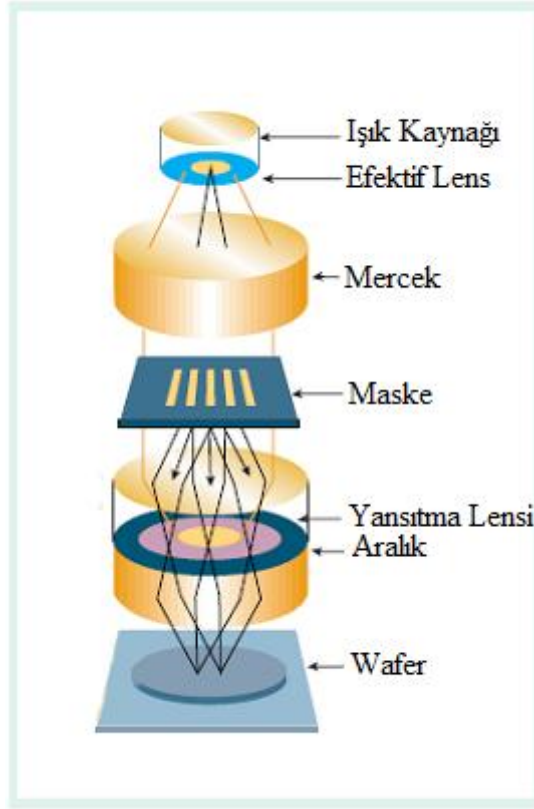


**Şekil 3.2.** (a), (b) ve (c) Tek Tabaka Grafen, Birkaç Tabaka Grafen ve Grafitin Raman Spektrumlarını Göstermektedir [88]

Grafen tabakalarının merkezindeki Raman spektrumu kusurların olmadığını teyit eden D pikini göstermemektedir. Bunun yerine Grafen ve Grafitteki şekil ve yoğunluk değişimleri 2D bandı tarafından gözlenmiştir. Tabaka sayısındaki artış 2D pikinin yoğunluğunu azaltmaktadır [87,89]. G pikinin yoğunluğundan dört kat daha yoğun olan keskin bir 2D piki tek tabaka grafeni göstermektedir. Grafenin özellikleri tabaka sayısına ve safsızlıklara bağlı olduğundan dolayı araştırmacılar tek tabaka ve birkaç tabaka grafenin kalite kontrolü ve karakterizasyonu için Raman Spektroskopisini kullanmışlardır. Ayrıca kalınlık belirleme, grafen içindeki kirlilikler, kusurlar ve doping işlemleri Raman Spektroskopisi ile incelenmiştir.

### 3.3 Litografi

Litografi, en temel anlamda resist olarak isimlendirilen ince bir film üzerine kalıpların desenlendirilmesi olarak ifade edilmektedir. Litografinin çeşitli teknikleri mikro alet veya radyasyon kullanılmasına göre sınıflandırılmaktadır. (fotolitografi, elektron-litografi vb.) Bu yüzden kalıpların basılması için fotolitografide fotonlar, elektro litografi de ise elektronlar kullanılmaktadır [90]. Şekil 3.3'de Litografi işleminin şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Optik Litografi İşleminin Şematik Gösterimi

Diğer taraftan litografide sert kalıp ile yumuşak resist tabaka arasında mekaniksel etkileşimler kullanılmıştır [91]. Bu tür litografide resist yüzeyle kalıp arasında etkileşimin çeşitli tipleri (elektriksel, mekaniksel, termal ve optiksel ) kullanılmıştır. Bunlar arasında optik litografi en temel ve ilk litografi tekniği olup yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [92]. Optik litografi kullanılarak mikro kanallar oluşturulmuştur. 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

dağılımını sağlanmaktadır. Daha sonraki aşamada çözücüü yüzeyden buharlaştırmak ve net film kalınlığını elde etmek için numune bir ısıtıcı üzerine belirli bir sıcaklıkta yeterli süre bekletilmektedir. Bir sonraki aşamada ise resist kaplı numune istenilen şekillerin bulunduğu maske ile birlikte UV ışık altına belirli bir süre tutulmaktadır. Uygulanan maskenin şekli mikro kanalları oluşturmak için tasarlanmaktadır. Daha sonra numune tekrar bir ısıtıcı üzerinde yine belirli bir sıcaklıkta ve yeterli süre bekletilmektedir. Bu aşamada sıcaklığın belli bir değerin üzerine çıkmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu işlemler sonucunda litografi işlemi tamamlanmış olacaktır.

### 3.4 Termal Buharlaştırma İşlemi

Termal buharlaştırma sistemlerinde genellikle yüksek buhar basıncına sahip ve kolay kontamine edilen metaller termal yöntemle buharlaştırılmaktadırlar. Bu sistemle alt taşlara homojen metal kaplamalar yapmak mümkündür.

En basit şekliyle termal buharlaştırma sistemlerinin genel çalışma prensibi ise aşağıda ifade edildiği gibidir. Burada kaplanması istenen metaller cihazın kaynak tutturucularına takılan genellikle tungsten bot veya sepetlerin içerisine yerleştirilir. Bu metaller içinde bulunduğu bot veya sepetten geçirilen yüksek akım ve oluşan yüksek sıcaklık sayesinde buharlaşmaktadırlar. Buharlaşan malzeme, vakum kazanı içerisinde bulunan kaynakların üzerinde konumlanan örnek tutucuya sabitlenmiş numune üzerinde yoğunlaşmaktadır.



Şekil 3.4. Termal Buharlaştırma Sisteminde Isıtıcı Flamanların Fotoğrafi

Yoğunlaşma esnasında homojenlik, kaplama kalitesi açısından önem arz etmektedir. Bu yüzden bu sistemlerde, malzeme buharlaşması esnasında örnek tutucu hafif bir şekilde döndürülmektedir. Yine bu sistemlerde numune üzerindeki kaplama kalınlığı quartz kristal osilatörü yöntemi ile kaplama esnasında rahatlıkla ölçülmektedir. Ayrıca bu sistemlerde buharlaştırma işleminin gerçekleştiği ortamın basıncı olabildiğince düşük olmak durumundadır. Bunun nedeni buharlaşma esnasında ortamda bulunan yabancı maddelerin kaplama kalitesini düşürmesidir. Termal buharlaştırma sistemlerin de genellikle vakum seviyesi minimum  $1 \times 10^{-4}$  torr maksimum  $1 \times 10^{-6}$  torr civarında iken metal buharlaştırmalar yapılmaktadır [93].

## 4.DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde numunelerin üretilmesinden, elektriksel ölçüm aşamasından ve kullandığımız İndiyum/Altın, Kadmiyum/Altın ve Krom/AltınGermanyum kontakların TLM yöntemi ile analizinden bahsedilmektedir.

### 4.1 Numunelerin Üretilmesi

Yapılan deneylerde alan etkili transistör üretiminde kullanılan grafenler mekanik ayırma yöntemi ile yüksek yönelimli pirolitik grafit veya Kışh grafitten elde edilmiştir. Grafen üretiminde ilk aşamada, HOPG veya Kışh grafit bir selo bant üzerine uygun miktarda konulmuştur. Daha sonra grafiti ince tabakalara ayırmak için bant defalarca yapıştırılıp açılmıştır. Bu işlem genelde bandın yüzeyi, pürüzsüz bir yüzeymiş gibi görünene kadar yapılmıştır.

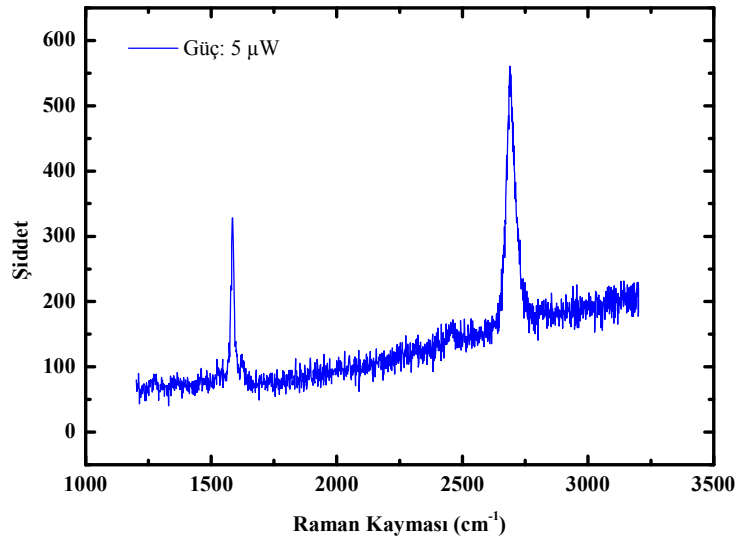


**Şekil 4.1.** Grafenin Optik Mikroskop Görüntüsü

Bir sonraki aşamada, bant yüzeyinde oluşan grafen tabakaları sırasıyla trikloretilen, aseton, metanol ve saf su içerisinde bir süre ultrasonik olarak ardından hidroklorik asit ile temizlenen 285 nm kalınlığında SiO<sub>2</sub> kaplı silisyum altaş üzerine aktarılmıştır. Alt taşın yüzeyine aktarılan tek tabaka grafenlerin yerini belirlemek üzere optik mikroskop kullanılmıştır. Optik mikroskobun 100X lik merceği altında



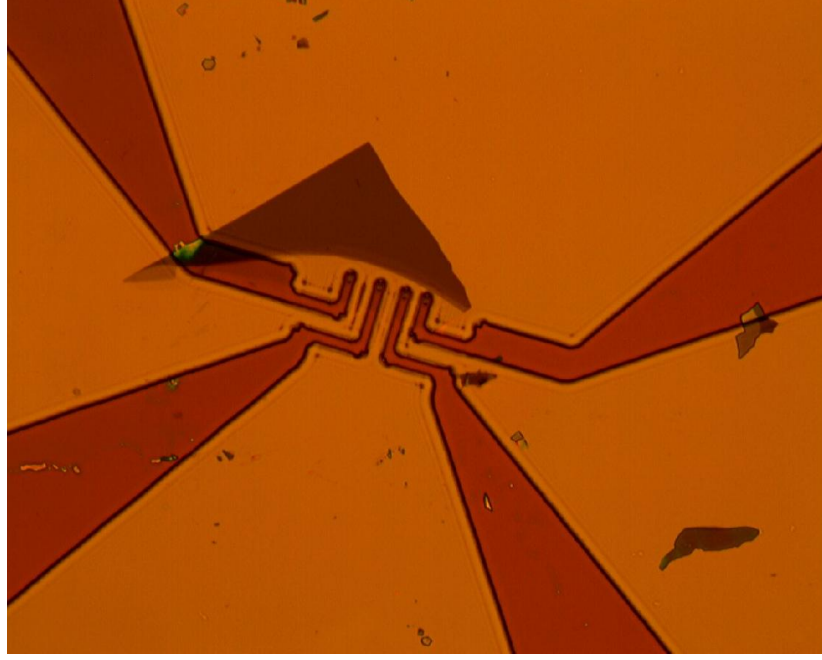
incelemeler yapılmıştır ve tek tabaka grafenlerin renginin çok tabakalı olanlara göre daha açık renkte olduğu gözlenmiştir. Tabaka sayısı arttıkça görünen renk daha koyu bir tona doğru kaymıştır. Ayrıca grafenin tabaka kalınlığı Raman spektroskopisi ile teyit edilmiştir. Grafenin tabaka sayısı arttıkça yoğunluk olarak daha büyük olan 2D piki ile G piki arasındaki oran azalmakta ve G piki 2D pikini aşmaktadır [94]. Şekil 4.2’de kullandığımız grafenlerin Raman Spektrumu gösterilmektedir. Bu grafikte yoğunluk olarak daha büyük olan 2D pikinin G pikine oranı 1,7 dir. Bu da kullandığımız grafenin tek tabaka olduğunu ispatıdır.



**Şekil 4.2.** Deneyler Esnasında Kullanılan Grafenin Raman Spektrumu

Yine optik mikroskop kullanılarak bulunan grafenlerin boyunun ve genişliğinin ölçümü yapılmıştır ve uygun olan grafen numuneleri bir sonraki aşamaya aktarılmıştır.

Bir sonraki aşamada yeri boyutları tespit edilen grafen tabakalar optik litografi yapmak için üzerleri uygun bir fotorezist ile kaplanır ve spinner cihazı sayesinde kaplanan bu rezist tabakasının daha iyi hale gelmesi sağlanır. Bu işlemden sonra fotorezist kaplanan numune 100 °C de bir dakika boyunca ısıtıcı üzerinde bekletilmiştir. Daha sonra TLM metoduna uygun olan maske deseni numune üzerine optik litografi yöntemi ile desenlendirilmiştir.



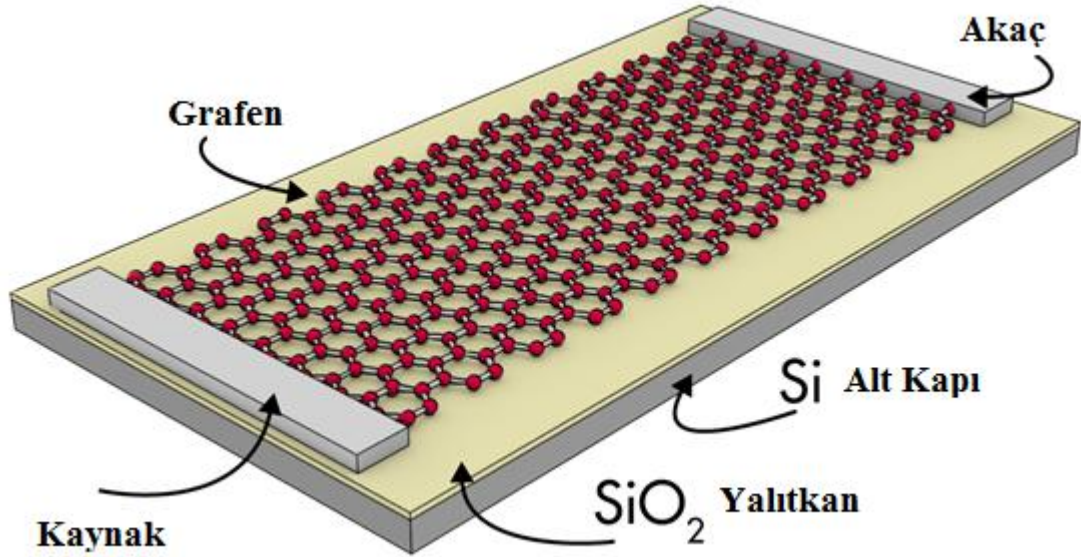
**Şekil 4.3.** Litografi İşlemi Yapılmış Grafen Numunenin Görüntüsü

Optik liografi işleminin ardından uygun desenlendirme işlemi yapılan numune üzerindeki şeklin açılması için MIF (Tetramethyl-Ammonium Hydroxide Solution) çözücü kullanılmıştır. Numune çözücü içerisinde yaklaşık olarak bir dakika kadar bekletilmiştir.

Bir sonraki aşamada ise grafen üzerinden elektriksel kontak almak için maske ile desenlendirilen şekil üzerine termal buharlaştırma ünitesi kullanılarak metal buharlaştırma işlemi yapılmıştır. Elektriksel kontaklar için indiyum/altın, kadmiyum/altın ve krom/altıngermanyum metalleri kullanılmıştır. Numune, buharlaştırma ünitesi içerisinde hedefe yerleştirildikten sonra metaller istenilen oranda istenilen sırada buharlaştırılmıştır. Buharlaştırma işlemi kaplamanın iyi olması için genelde  $10^{-6}$  torr basınç altında gerçekleştirilmiştir. Buharlaştırma işlemi tamamlanan numuneler bir sonraki işlem olan lift-off için beş dakika kadar aseton içinde bekletilmiştir. Aseton sonrasında birkaç dakika metanol ve hemen sonrasında bol miktarda saf su içinde bekletilmiştir. Numune tamamen kurutulup elektriksel ölçüme hazırlanmıştır.

## 4.2 Elektriksel Ölçüm Aşaması

Grafen numunelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için grafen tabanlı Alan Etkili Transistör üretilmiştir. Grafen numunenin analizi için Keithley 2612A elektriksel ölçüm sistemi kullanılmıştır.

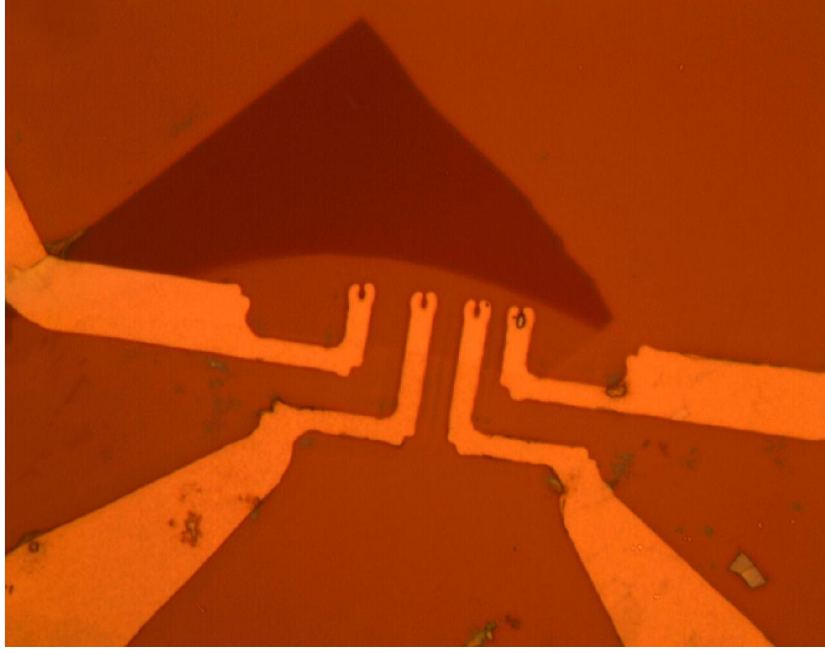


Şekil 4.4. Grafen Alan Etkili Transistörün Elektriksel Ölçüm Şeması

Grafen Alan Etkili Transistörlerin elektriksel ölçüm aşamasında yukarıda gösterildiği gibi bir yapı kullanılmaktadır. Temel transistör yapısı gibi grafen üzerindeki etkileri ölçmek üzere kaynak ve akaç uçları bulunmaktadır. Elektrik alan etkisini verebilmek için kapı ucu bulunmaktadır.

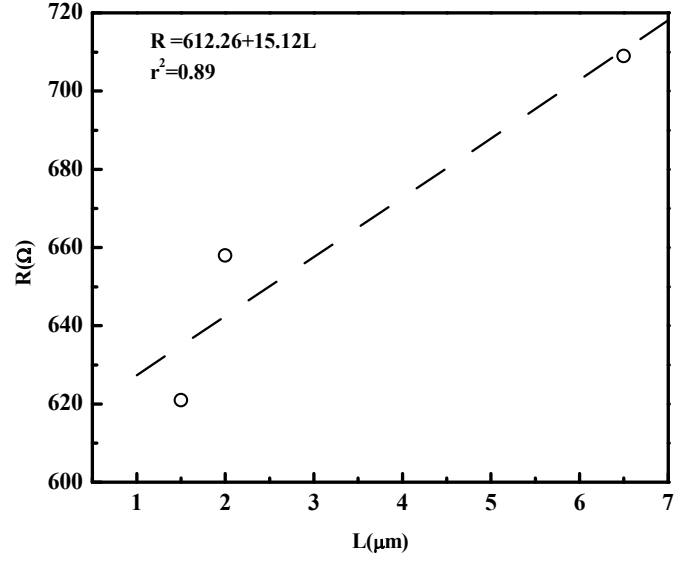
## 4.3 İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi

İndiyum/Altın (8nm/20nm) kontaklı grafen numunenin ilk olarak  $V_g = -50V$  ile  $+50V$  aralığında  $I_{ds}-V_{ds}$  ölçümü yapılmıştır.  $I_{ds}-V_{ds}$  grafiğinin eğiminden yararlanılarak toplam direnç değerleri belirlenmiştir. Buradan en düşük toplam direnç  $620\Omega$  ve en yüksek toplam direnç  $1000\Omega$  olarak bulunmuştur. Daha sonra kontak öz direncini hesaplamak için TLM metodu kullanılarak bulunan toplam dirençlerin kontaklar arası mesafeye karşı grafiği çizilmiştir. Şekillerde gösterilen grafikler yardımı ile İndiyum/Altın numunenin kontak direnci ve kontak öz direnci  $V_g = -50V$  ile  $+50V$  aralığında belirlenmiştir ve grafiği çizilmiştir.

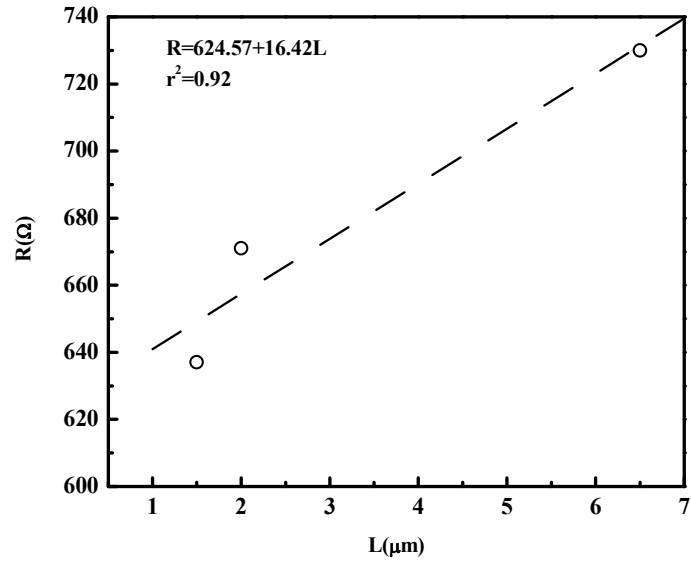


**Şekil 4.5.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

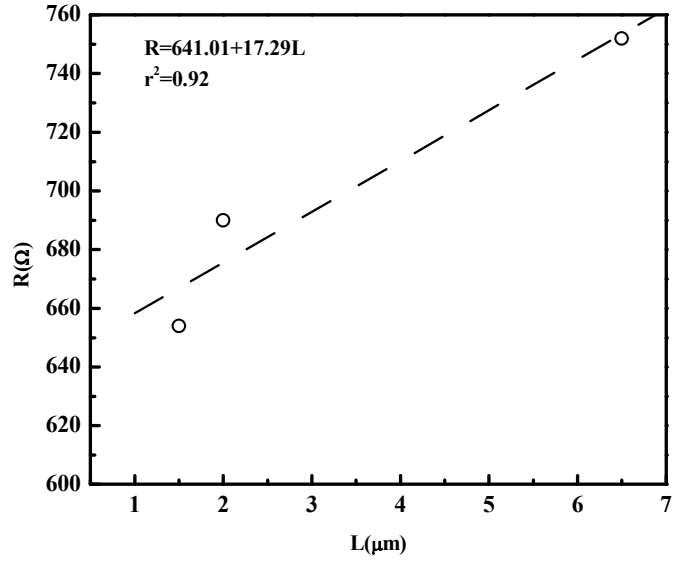
İndiyum-Altın kontaklı numunenein kapı voltajına bağlı TLM ölçümleri Şekil 4.6 ile 4.16 arasındaki grafiklerde gösterilmektedir. Bu grafiklere göre İndiyum/Altın kontakın kapı voltajına bağlı olarak direncinde belirgin bir değişim görülmektedir. Bunun neticesinde numunenenin kontak direncide kapı voltajına bağlı olarak değişmektedir.



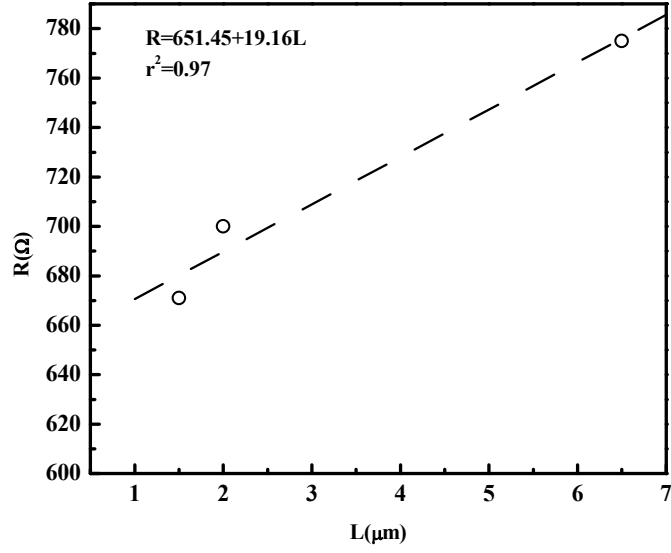
Şekil 4.6. İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



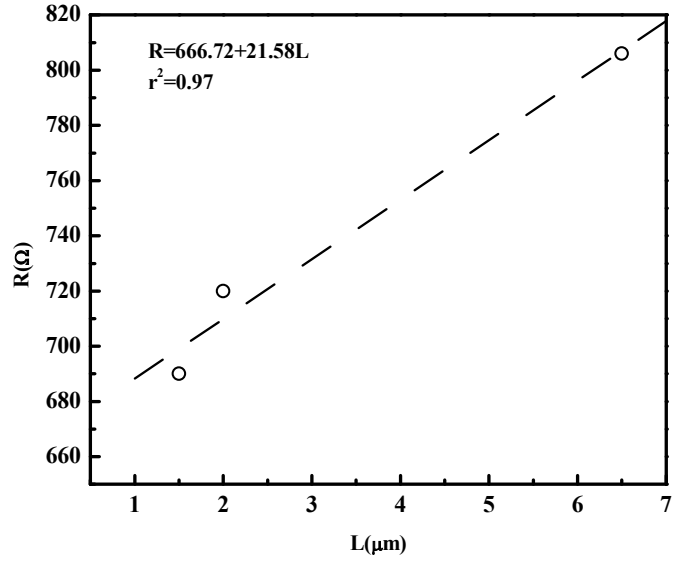
Şekil 4.7. İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



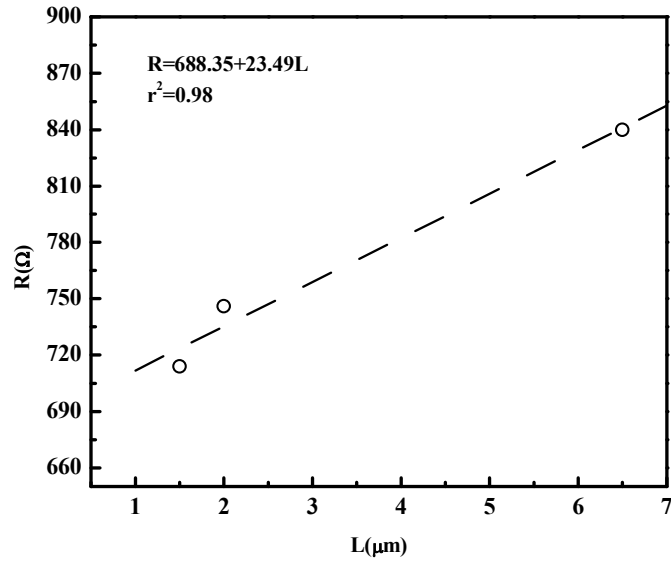
**Şekil 4.8.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



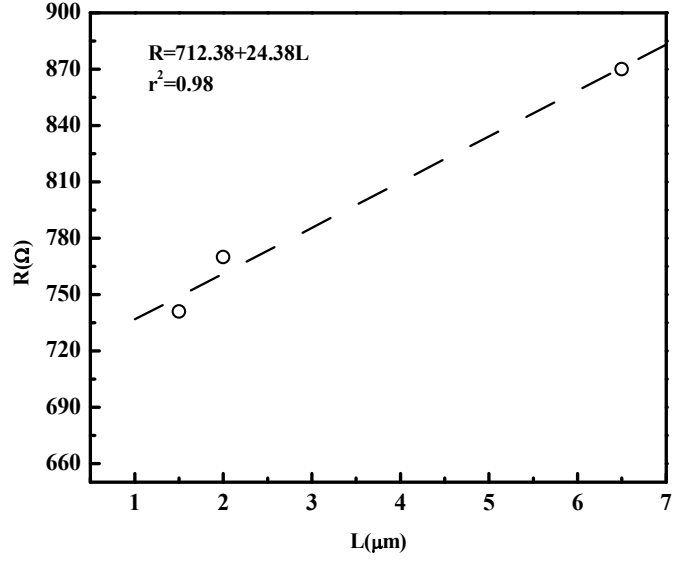
**Şekil 4.9.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



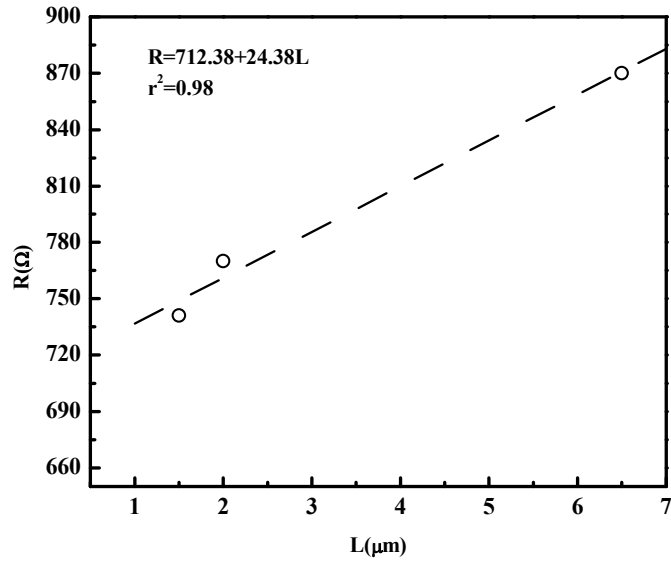
**Şekil 4.10.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



**Şekil 4.11.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = 0$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

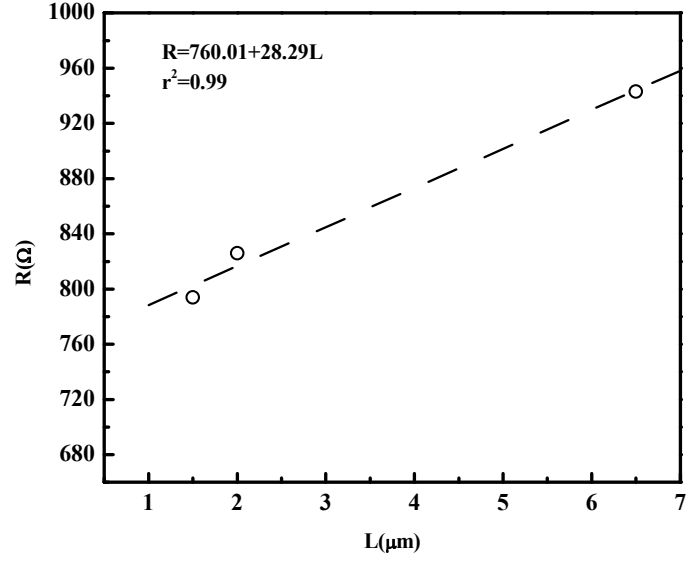


**Şekil 4.12.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

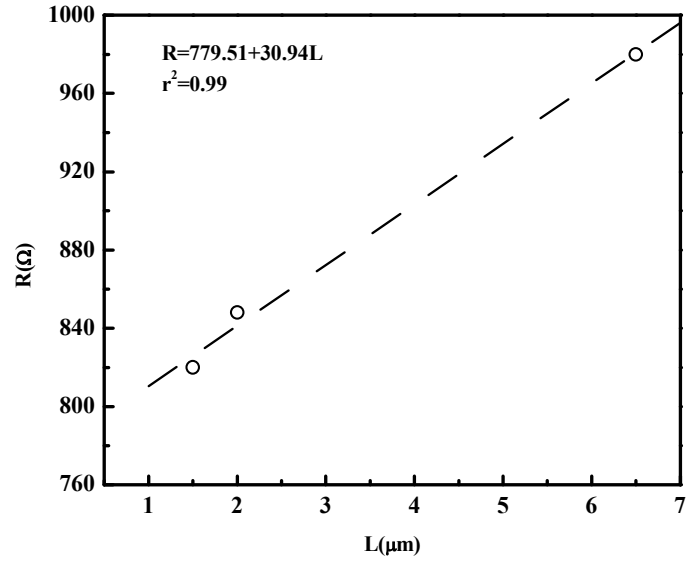


**Şekil 4.13.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

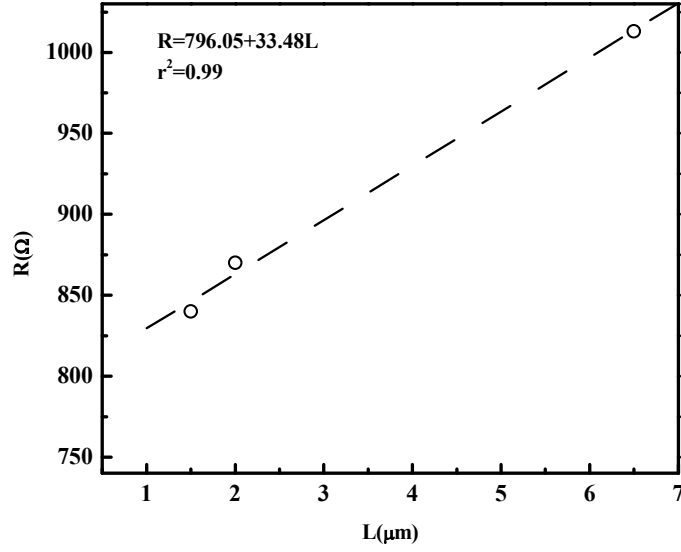




**Şekil 4.14.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = 30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

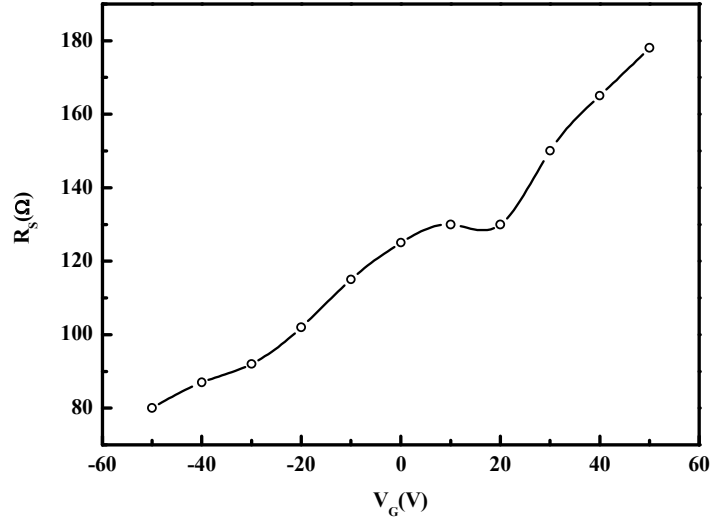


**Şekil 4.15.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = 40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

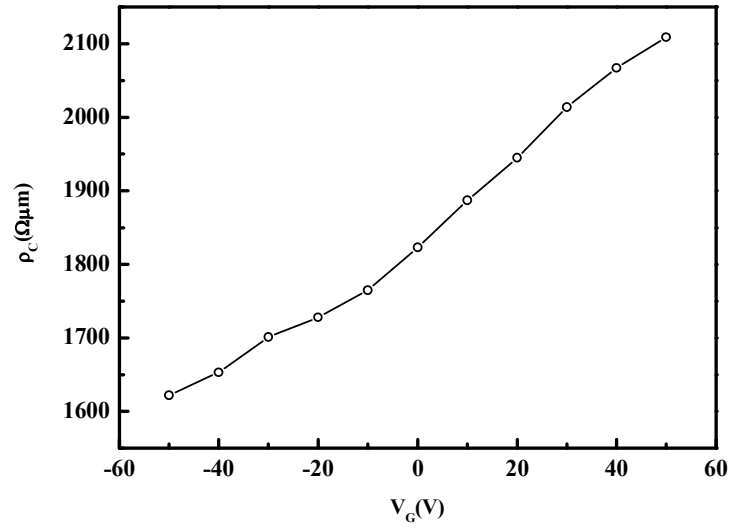


**Şekil 4.16.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

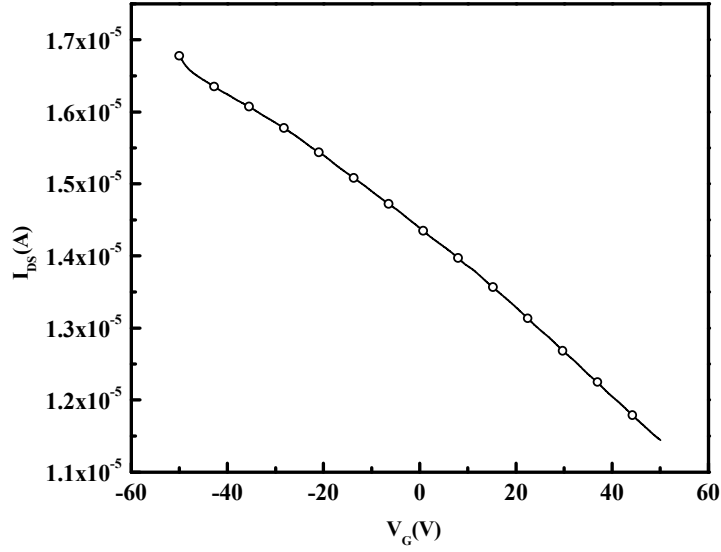
Daha sonra numunenin  $V_g = -50V$  ile  $+50V$  aralığında  $I_{ds}-V_g$  ölçümü yapılmıştır. TLM yöntemi ile İndiyum/Altın numunenin kontak direnci  $V_g = 0V$  durumunda  $344 \Omega$ , kontak öz direnci  $1800 \Omega\mu m$  ve grafenin tabaka direnci  $125 \Omega$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.17'de gösterildiği gibi İndiyum/Altın kontaklı numunenin tabaka direncinin kapı voltajına bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir. Şekil 4.18'de gösterilen grafikte de görüldüğü üzere İndiyum/Altın kontakın kontak öz direncinin kapı voltajından etkilendiği bariz bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 4.17.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği



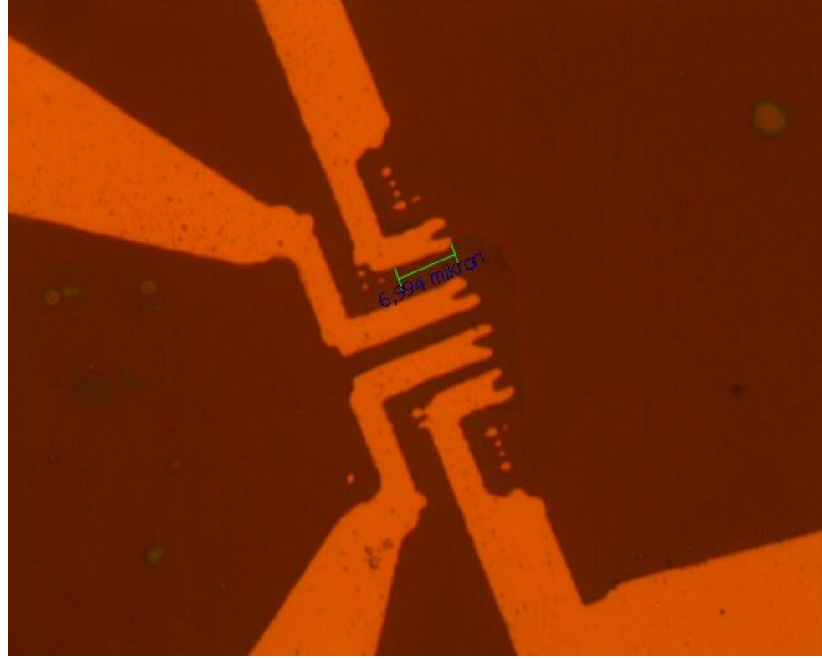
**Şekil 4.18.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı KONTAK Özdirenci Grafiği



**Şekil 4.19.** İndiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_{DS}=0.01$  V da Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği

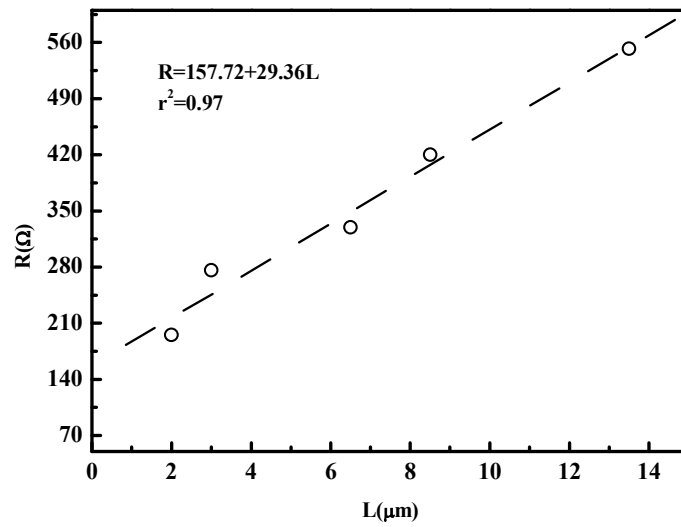
#### 4.4 Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi

Kadmiyum/Altın (8 nm/30 nm) kontaklı grafen numunenin ilk olarak  $V_g = -50$  V ile +50 V aralığında  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  ölçümü yapılmıştır.  $I_{ds}$ - $V_{ds}$  grafiğinin eğiminden yararlanılarak toplam direnç değerleri belirlenmiştir. Buradan en düşük toplam direnç 200  $\Omega$  ve en yüksek toplam direnç 550  $\Omega$  olarak bulunmuştur. Dah sonra kontak öz direncini hesaplamak için TLM metodu kullanılarak bulunan toplam dirençlerin kontaklar arası mesafeye karşı grafiği çizilmiştir. Şekillerde gösterilen grafikler yardımı ile Kadmiyum/Altın numunenin kontak öz direnci  $V_g = -50$  V ile +50 V aralığında belirlenmiştir ve grafiği çizilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi Kadmiyum/Altın kontaklı numunenin farklı kapı voltajlarında çok yakın kontak öz direnci gösterdiği gözlenmiştir.

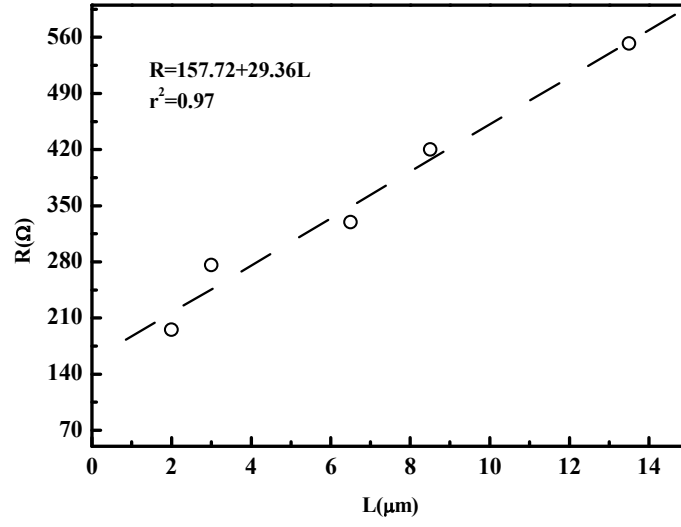


**Şekil 4.20.** Kadmiyum-Altın Kontaktlı Grafen Numunenin 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

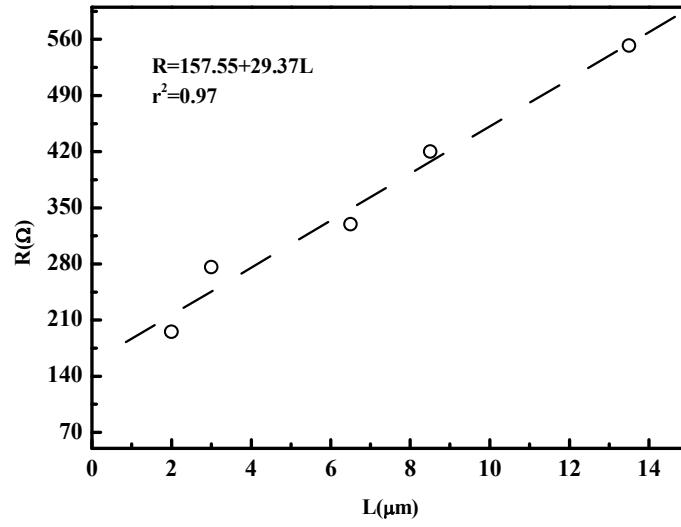
Şekil 4.21 ile Şekil 4.31 arasındaki grafiklere bakacak olursak Kadmiyum-Altın kontaktlı numunenin direnç değerlerinin farklı kapı voltajına bağlı olarak çok belirgin bir değişim göstermediği görülmektedir.



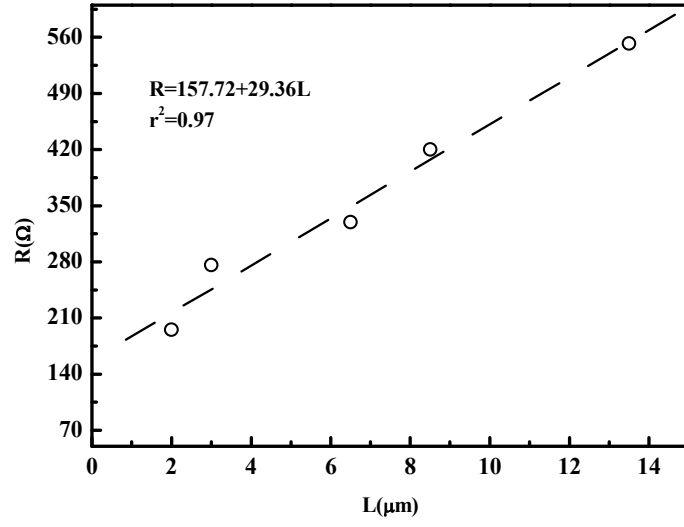
**Şekil 4.21.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



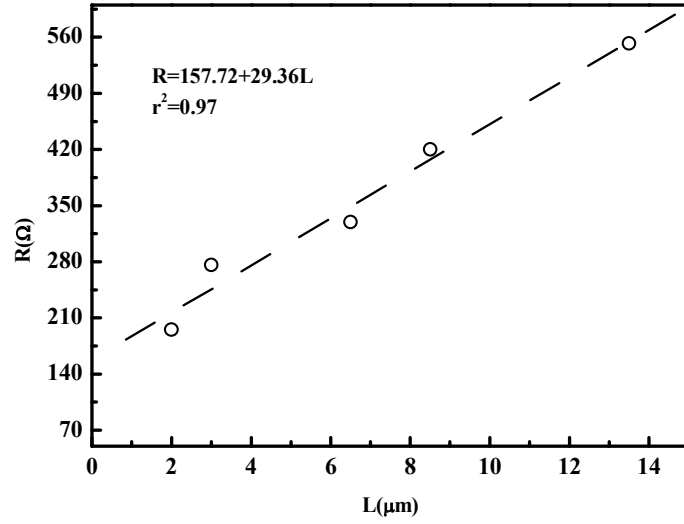
**Şekil 4.22.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



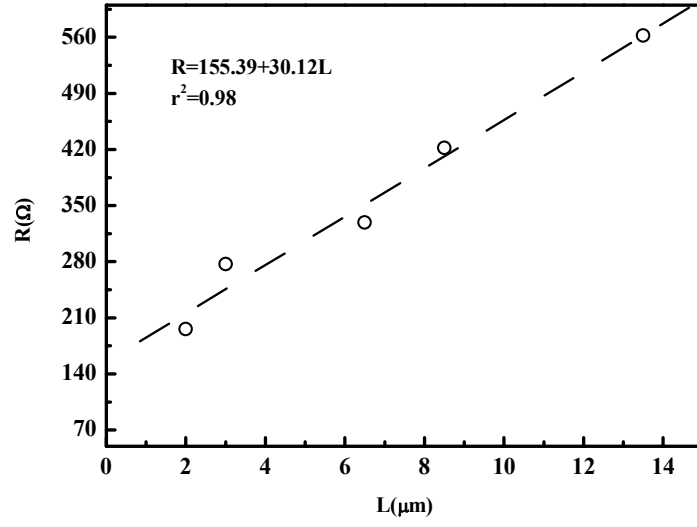
**Şekil 4.23.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



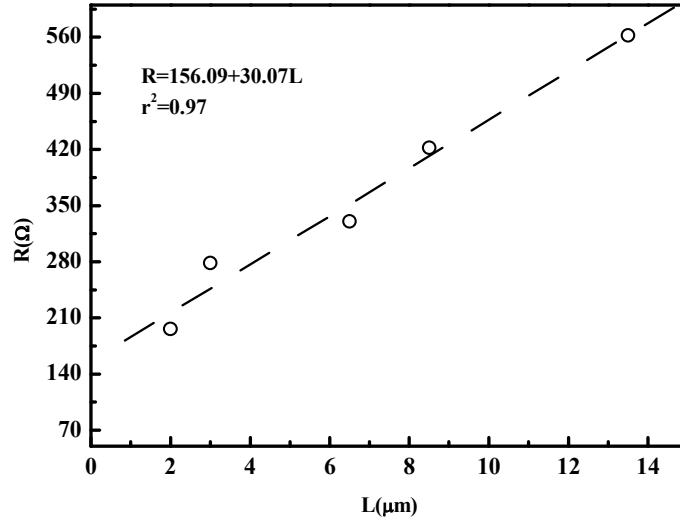
**Şekil 4.24.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



**Şekil 4.25.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G = -10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

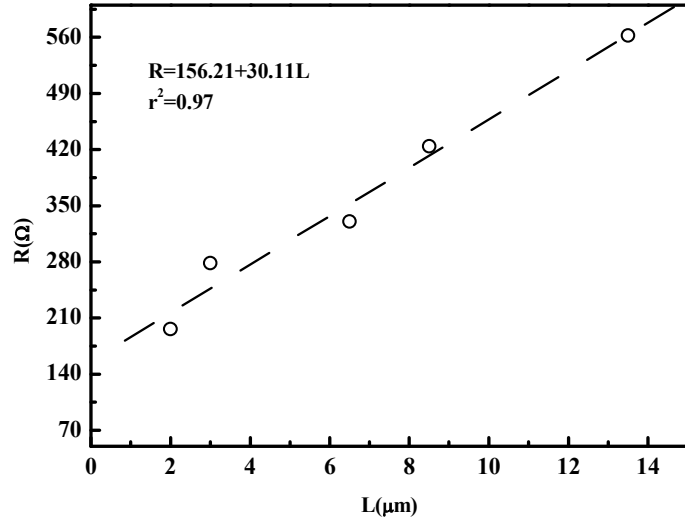


**Şekil 4.26.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=0$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

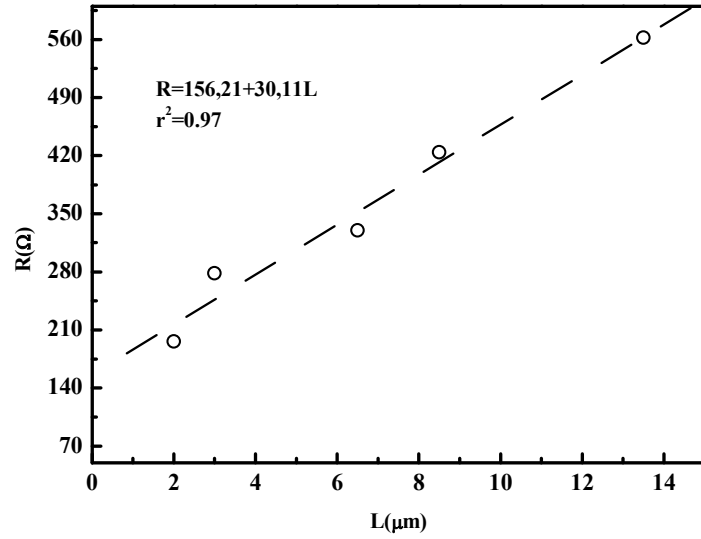


**Şekil 4.27.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

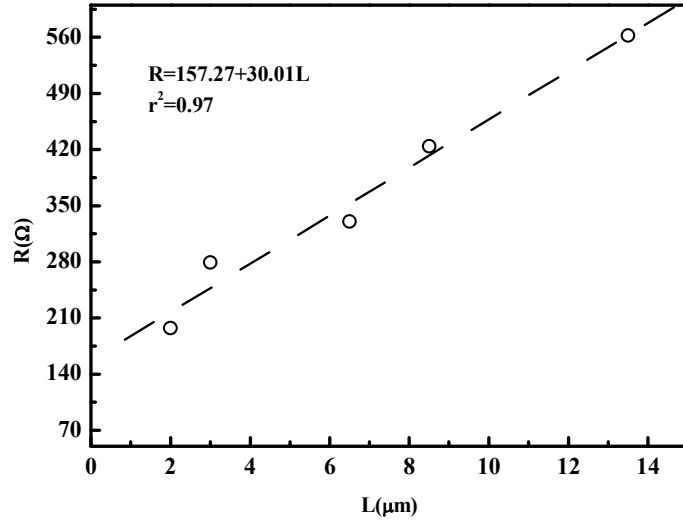




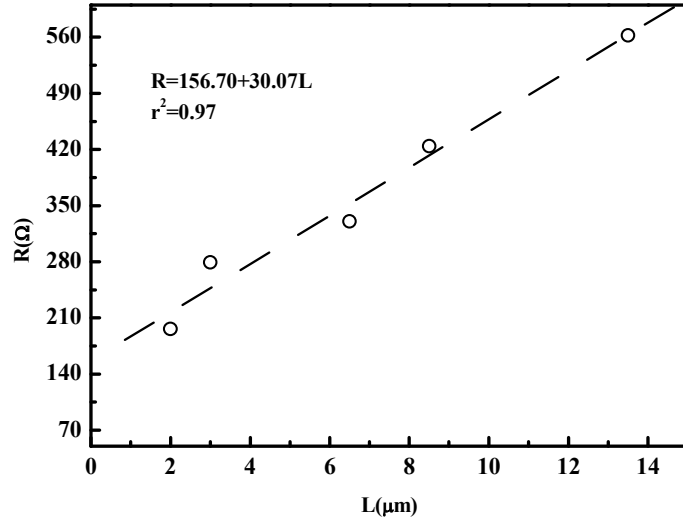
**Şekil 4.28.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



**Şekil 4.29.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



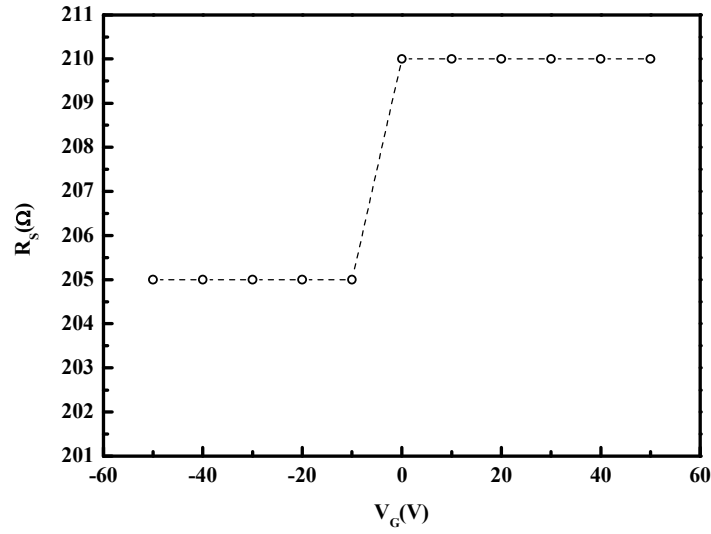
**Şekil 4.30.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



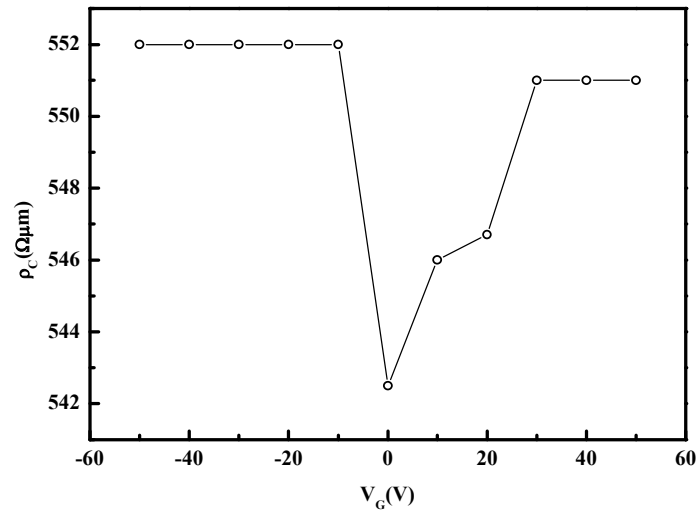
**Şekil 4.31.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_G=50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

TLM yöntemi ile Kadmiyum/Altın numunenin kontak direnci  $V_g = 0$  V durumunda  $78 \Omega$ , kontak öz direnci  $546 \Omega \mu\text{m}$  ve grafenin tabaka direnci  $205 \Omega$  olarak bulunmuştur. Kadmiyum kontaklı numunenin tabaka direncinin kapı voltajına karşı

değişim grafiğine bakacak olursak bu numunedeki grafenin tabaka direncinin kapı voltajına bağlı olarak değişmediği görülmektedir ve bu sonuç Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Şekil 4.33'de gösterilen grafiği inceleyecek olursak Kadmiyum/Altın kontak öz direncinin kapı voltajından etkilenmediği bariz bir şekilde görülmektedir

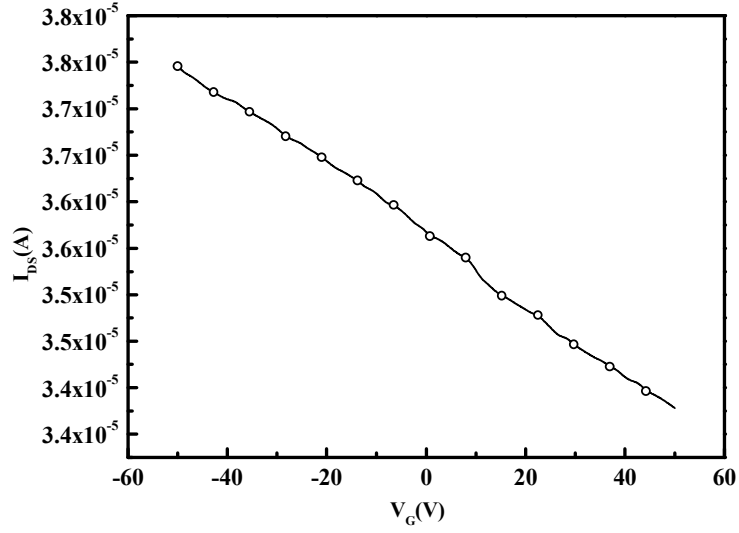


**Şekil 4.32.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği



**Şekil 4.33.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kontak Öz direnci Grafiği

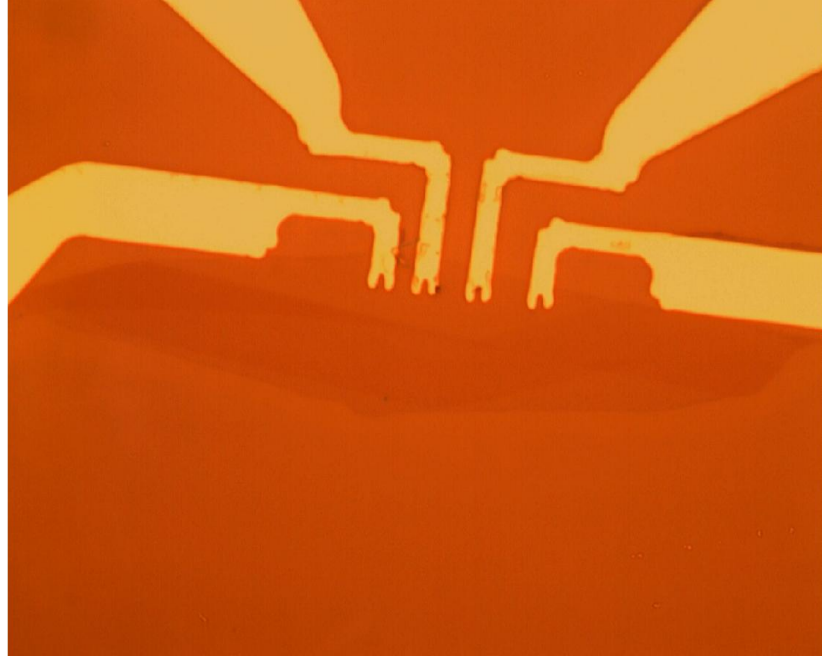
Daha sonra Şekil 4.34’de gösterildiği gibi numunenin  $V_g = -50V$  ile  $+50V$  aralığında  $I_{ds}-V_g$  ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sonucunda grafen numunenin ambipolar özelliği gözlenememiştir.



**Şekil 4.34.** Kadmiyum-Altın/Grafen Alan Etkili Transistörün  $V_{DS}=0.01$  V’da Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği

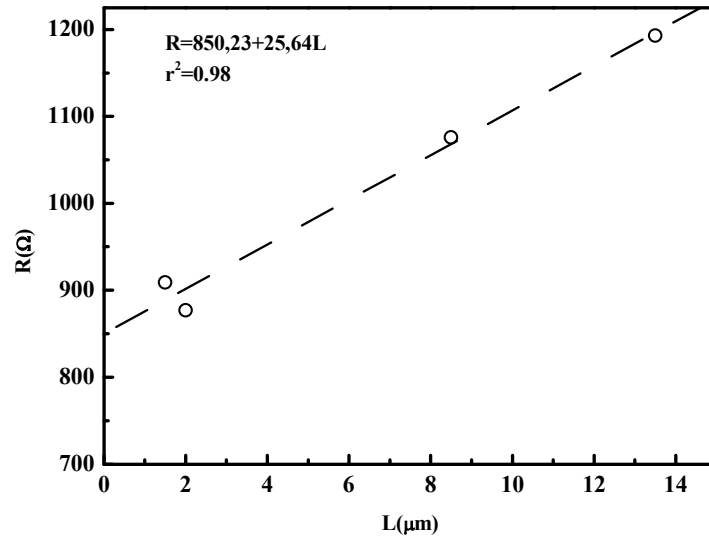
#### 4.5 Krom-AltınGermanyum/Grafen Alan Etkili Transistörün Analizi

Krom/AltınGermanyum (3 nm/50 nm) kontaklı grafen numunenin ilk olarak  $V_g = -50$  V ile  $+50$  V aralığında  $I_{ds}-V_{ds}$  ölçümü yapılmıştır.  $I_{ds}-V_{ds}$  grafiğinin eğiminden yararlanılarak toplam direnç değerleri belirlenmiştir. Buradan en düşük toplam direnç  $850 \Omega$  ve en yüksek toplam direnç  $4000 \Omega$  olarak bulunmuştur. Daha sonra kontak öz direncini hesaplamak için TLM metodu kullanılarak bulunan toplam dirençlerin kontaklar arası mesafeye karşı grafiği çizilmiştir. Şekillerde gösterilen grafikler yardımı ile Krom/AltınGermanyum numunenin kontak öz direnci  $V_g = -50$  V ile  $+50$  V aralığında belirlenmiştir ve grafiği çizilmiştir.

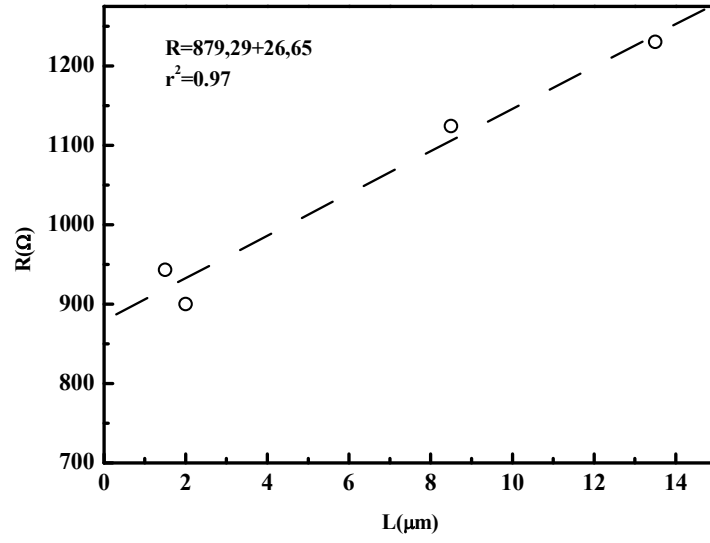


**Şekil 4.35.** Krom-Altın Germanyum/Grafen Alan Etkili Transisrötün 100X Optik Mikroskop Görüntüsü

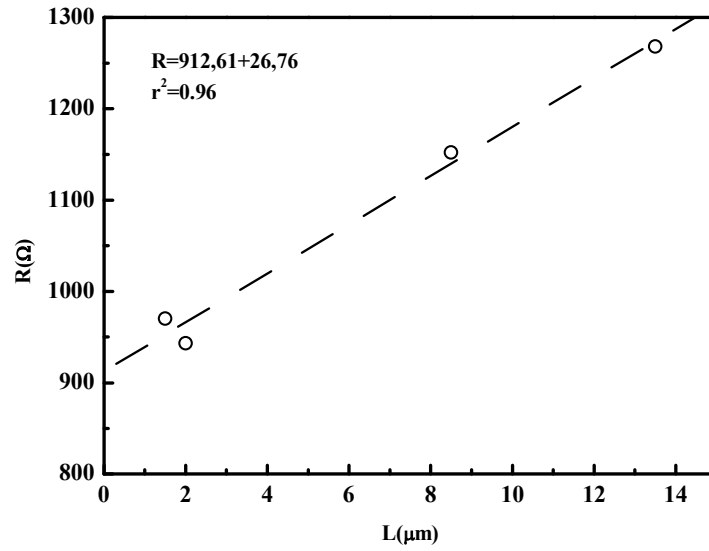
Şekil 4.36 ile Şekil 4.46 arasındaki grafiklere bakıldığında Krom-Altın Germanyum kontaklı numunenin toplam direnç değerlerinin farklı kapı voltajına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir.



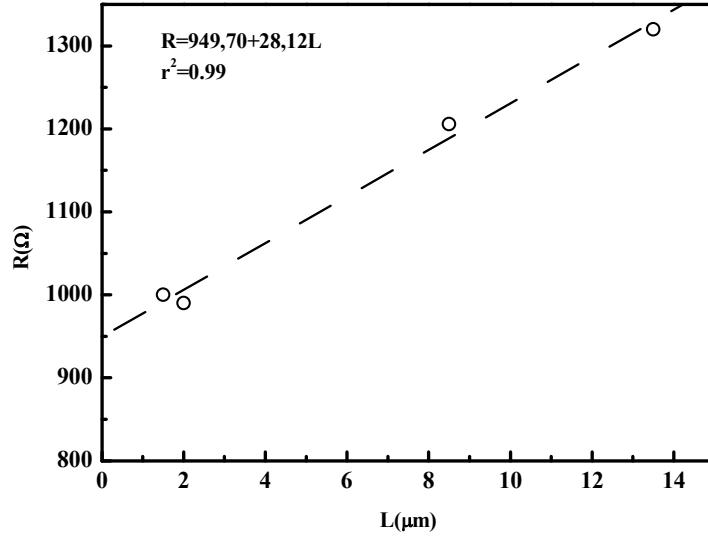
**Şekil 4.36.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=-50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



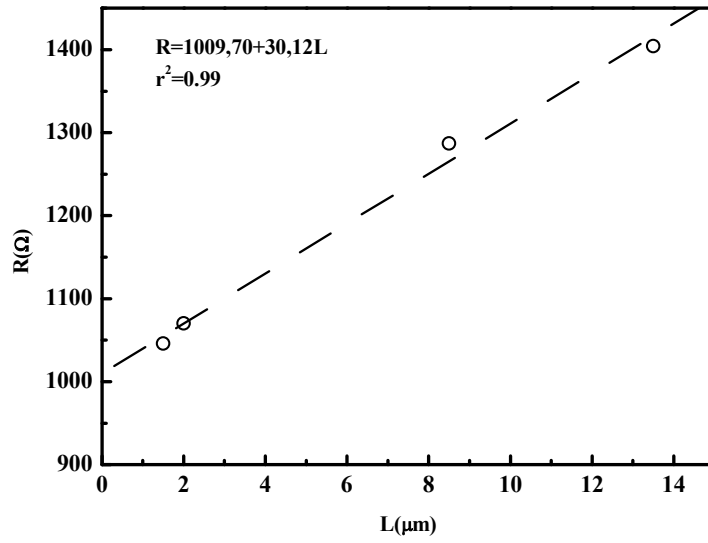
**Şekil 4.37.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G = -40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



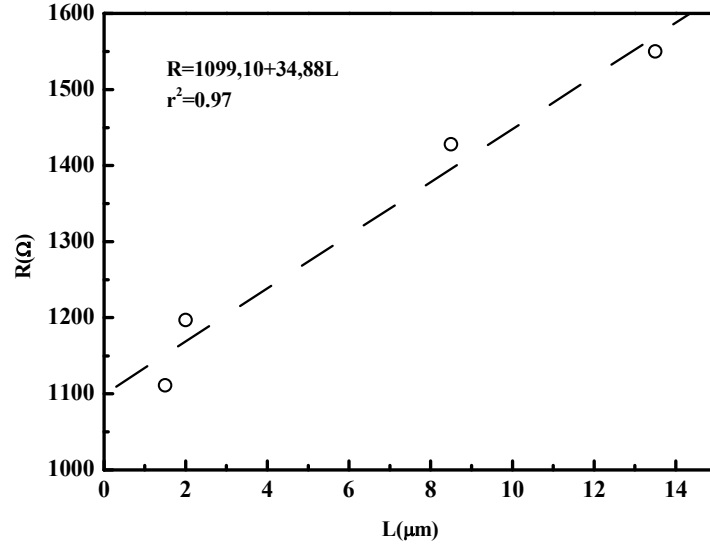
**Şekil 4.38.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G = -30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



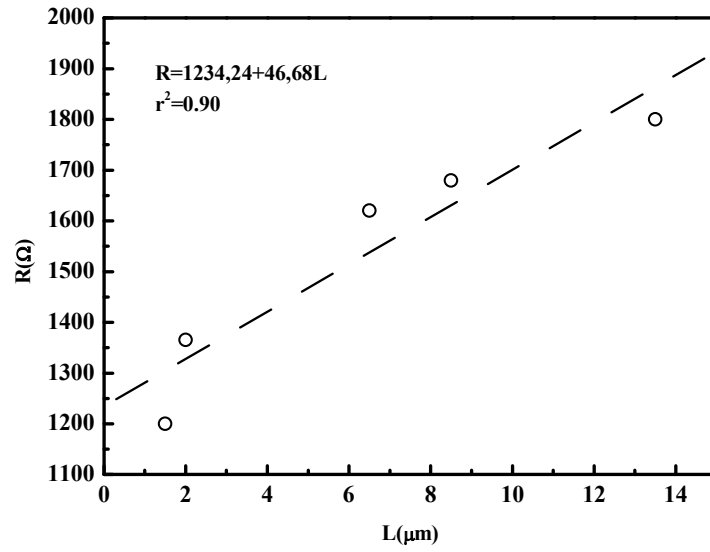
**Şekil 4.39.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G = -20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



**Şekil 4.40.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G = -10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

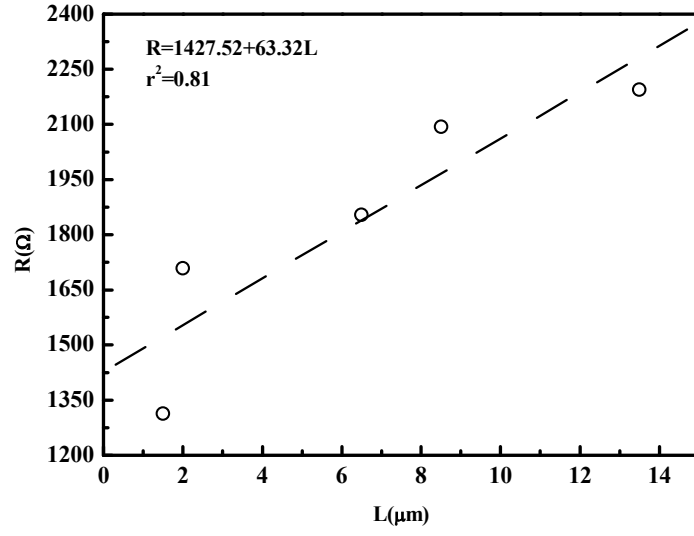


Şekil 4.41. Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=0$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

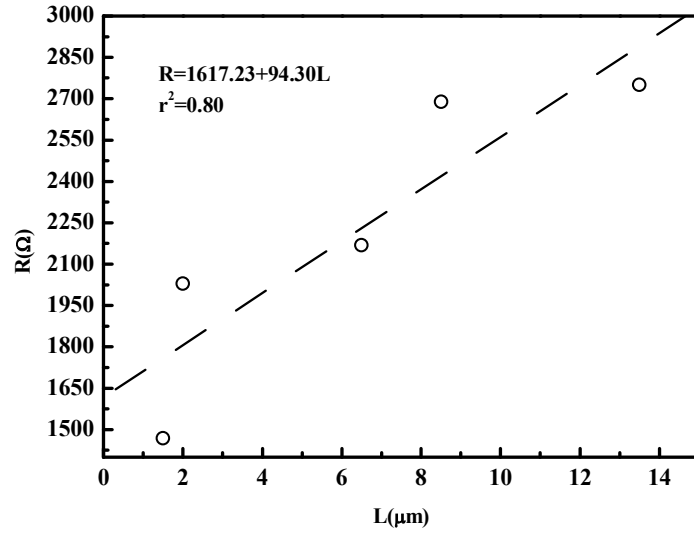


Şekil 4.42. Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=10$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

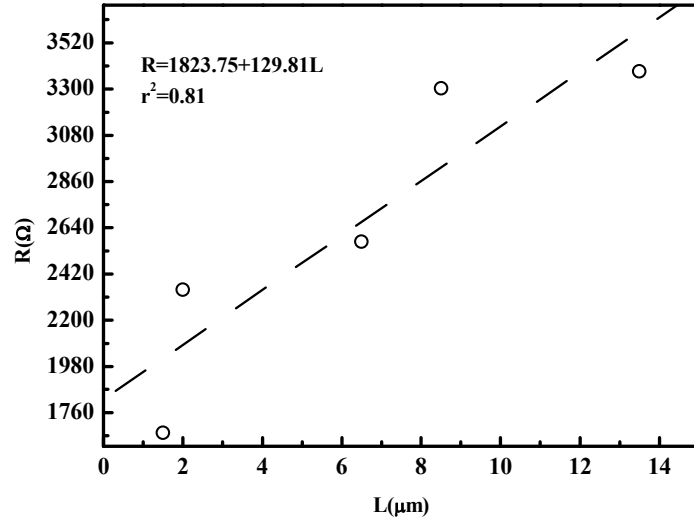




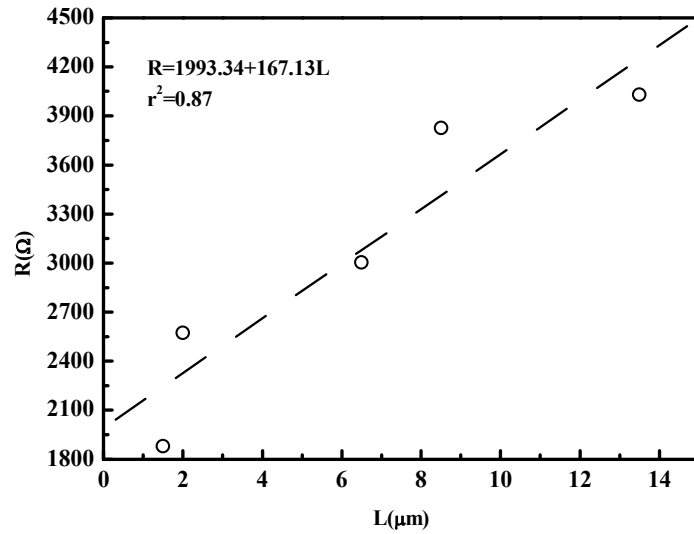
**Şekil 4.43.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=20$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



**Şekil 4.44.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=30$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



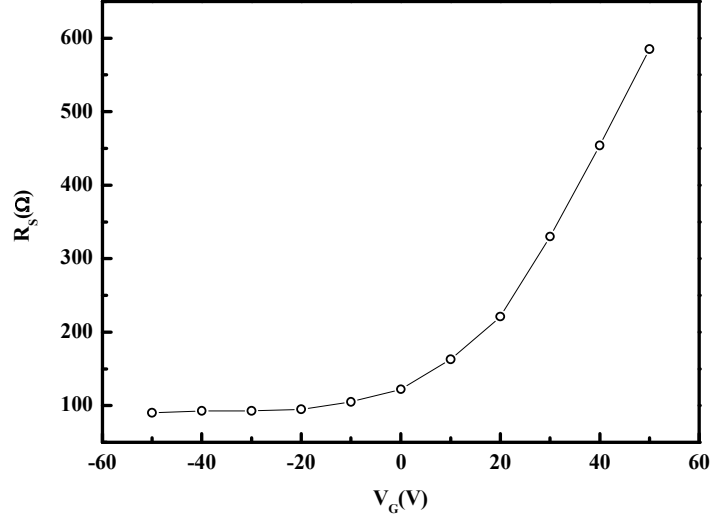
**Şekil 4.45.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=40$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği



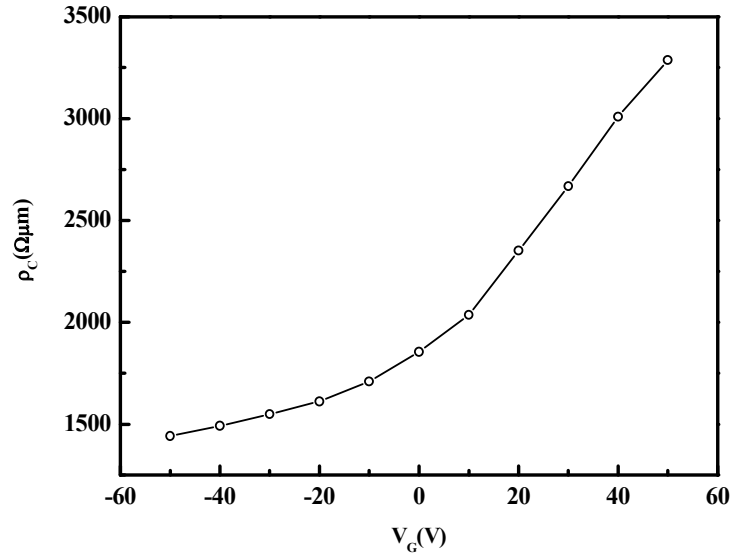
**Şekil 4.46.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün  $V_G=50$  V'daki Kontaklar Arası Mesafeye Bağlı Toplam Direnç Grafiği

TLM yöntemi ile Krom/AltınGermanyum numunenin kontak direnci  $V_g = 0$  V durumunda  $492 \Omega$ , kontak öz direnci  $1475 \Omega\mu\text{m}$  ve grafenin tabaka direnci  $105 \Omega$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca İndiyum kontakta olduğu gibi Krom/AltınGermanyum kontaklı numunenin tabaka direncinin kapı voltajından etkilendiği Şekil 4.47'de gösterilmektedir. Şekil 4.48'de gösterilen grafiğe inceleyecek olursak

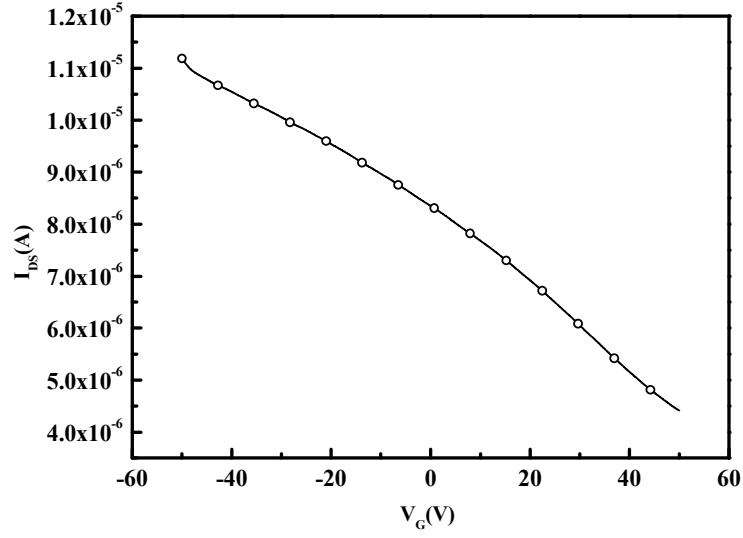
Krom/AltınGermanyum kontağın kontak öz direncinin kapı voltajından etkilendiği bariz bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.47. Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Tabaka Direnci Grafiği



Şekil 4.48. Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kontak Öz direnci Grafiği



**Şekil 4.49.** Krom/Altın Germanyum/Alan Etkili Transistörün Kapı Voltajına Bağlı Kaynak-Akaç Akımı Grafiği

Daha sonra Şekil 4.49’de gösterildiği gibi numunenin  $V_g = -50$  V ile  $+50$  V aralığında  $I_{ds}$ - $V_g$  ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüm sonucunda grafen numunenin ambipolar özelliği gözlenememiştir. Bunun nedeni olarak depo edilen kontak metallerinin grafeni n tipi katkıladığı düşünülmektedir.

**Tablo 4.1** Kullanılan Metal/Grafen Kontaktarın Belirlenen Özellikleri

Kontak Metali	Kontak Direnci $R_C$ ( $\Omega$ )	Kontak Özdirenci $\rho_c$ ( $\Omega\mu m$ )	Tabaka Direnci $R_S$ ( $\Omega$ )
In/Au	344	1800	125
Cd/Au	78	546	205
Cr/AuGe	492	1475	105

**Tablo 4.2.** Literatürdeki Bazı Metal/Grafen Kontakların Belirlenmiş Özellikleri

<b>Kontak Metali</b>	<b>Kontak Özdirenci <math>R_C</math> (<math>\Omega\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Referans</b>
Ti/Au	$800 \pm 200$	[18]
Ti/Au	1000	
Cr/Au	1000	[19]
Ni	500	
Ti/Au	-	[20]
Ni	$790 \pm 300$	[22]
Ni	500	
Pd	250	[23]
Ti/Au	-	[24]
Ni	250	[27]
Ti	$700 \pm 500$	[28]
Ag	3400-1400	
Cu	8800-2900	[30]
Au	940-630	
Pd	800-570	

## SONUÇ

Bu çalışmada, mekanik ayrılma yöntemi ile üretilen grafen numuneleri fabrikasyon işlemlerinin ardından alan etkili transistörlere dönüştürülmüştür. Farklı kontak metalleri kullanılarak transistörlerin elektriksel karakteristikleri belirlenmiştir ve TLM metodu ile kontak direnci analizleri yapılmıştır. Grafen üretiminde mekanik ayrılma yönteminin kullanılmasının nedeni ise kolay, ucuz ve kusursuz grafen üretebilen bir yöntem olmasıdır. Bu çalışmada yalıtkan taban olarak 285 nm silisyumdioksit kaplı silisyum alttaşlar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan transistörlerdeki grafenlerin tek tabaka oldukları Raman Spektrumları ile teyit edilmiştir.. Yapılan bu çalışmada amaç, grafenin performansında oldukça yüksek etkiye sahip kontak direncinin minimuma indirilmesi ve grafenden en üsr düzeyde performans elde edilecek kontak metalinin belirlenmesidir. Bu amaçla İndiyum/Altın, Kadmiyum/Altın ve Krom/Altı-Germanyum metalleri literatür araştırmamız neticesinde ilk olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Bu kontak metalleri ile elde edilen sonuçları incelediğimizde grafene yapılan metal kontakların her birinin farklı kontak direnci gösterdiği ve bazılarının kapı voltajındaki değişimlere karşı kararlı bir kontak direnci yapısı sergilediği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçları aşağıda şu şekilde sıralayabiliriz,

İndiyum/altın kontaklı numunenin Tablo 4.1’de gösterilen özelliklerine bakıldığında nispeten yüksek bir kontak öz direnci değeri görülmektedir. Bu değer her ne kadar yüksek olsa da Tablo 4.2’de gösterilen gümüş ve bakır metallerinin kontak öz direnci değerinden çok daha iyi değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca İndiyum/Altın kontağının kontak öz direnci ve tabaka direnci kapı voltajına bağlı olarak değişmektedir

Tablo 4.1’de özellikleri gösterilen kadmiyum/altın kontağının indiyuma göre çok daha düşük bir kontak öz direnci değerine sahip olduğu görülmektedir. Sahip olduğu bu değeri Tablo 4.2’deki diğer metaller ile karşılaştıracak olursak kadmiyumun titanyum/altın, krom/altın, nikel, titanyum, gümüş, bakır, altın, paladyum kontaklarına göre çok daha düşük kontak öz direnci değerine sahip olduğu görülmektedir. Yani kadmiyum metali bu metallerin yerine kullanılacak en

uygun metallere biridir. Ayrıca kadmiyumun kontak öz direnci kapı voltajına bağlı olarak çok fazla değişmemekte ve kararlı bir yapı sergilemektedir.

Krom/AltınGermanyum kontağı ise indiyuma göre daha düşük fakat kadmiyuma göre oldukça yüksek bir kontak öz direnci değerine sahiptir. Fakat Krom/AltınGermanyum kontağı yine Tablo 4.2'deki metallere ile mukayese edildiğinde gümüş ve bakıra göre daha düşük değerde bir dirence sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda krom/altın-germanyum kontağı gümüş ve bakır kontaklarının yerine kullanıldığında grafen üzerindeki düşük performans etkisi bir miktar daha azaltılmış olacaktır. Bunun yanısıra Kadmiyum kontağın aksine Krom/AltınGermanyum kontağın İndiyum kontakta da olduğu gibi kontak öz direncinin kapı voltajına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir.

Kapı voltajına bağlı olarak indiyum/altın ve krom/altın-germanyum'un kontak öz dirençlerinin değişmesi, kontak altındaki grafenin Fermi seviyesinin değişmesi ile açıklanabilir. Kadmiyum/altın kontakta görülen kararlı öz direnç, kadmiyum-grafen arayüzeyindeki durum yoğunluğunun fazla olması ve Fermi seviyesini sabitlemesi ile izah edilebilir.

Metallerin grafen ile etkileşimi depo etme ardından oluşturacağı kusurlar ve grafendeki durum yoğunluğu değişimi yapılan bu tez çalışmasından sonraki araştırma konusu olarak düşünülmektedir. Bu alanda yapılacak çalışmaların grafenin teknolojiye uyarlanmasında önemli katkılar sağlayacağı umummaktadır.

## KAYNAKLAR

1. C.N.R.Rao, A.K.Sood, K.S.Subrahmanyam, and A.Govindaraj., Graphene: the new two-dimensional nanomaterial, *Angewandte Chemie.*, 48, 7752–7777, 2009.
2. Peierls, R. E. *Ann. I. H. Poincare.*, Quelques propriétés typiques des corps solides, *Ann I. H. Poincaré.*, 5, 177-222, 1935.
3. Landau, L. D., *Theorie der Phasenumwandlung* *Phys. Z. Sowjetunion.*, 11, 26-47, 1937.
4. Mermin, N. D., Crystalline order in two dimensions. *Phys. Rev.*, 176, 250-254, 1968.
5. Evans, J. W., Thiel, P. A., Bartelt, M. C., Morphological Evolution During Epitaxial Thin Film Growth: Formation of 2D Islands and 3D Mounds. *Surface Science Reports.*, 61, 1-128, 2006.
6. Venables, J. A.;Spiller, G. D. T.; Hanbücken, M., Nucleation and Growth of Thin Films *Rep. Prog. Phys.*, 47, 399-459, 1984.
7. Novoselov, K. S, Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D, Zhang, Y, Dubonos, S. V, Grigorieva, I. V, Firsov, A. A., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 306, 666-669, 2004.
8. Slonczewski, J. C., Weiss, P.R., Band structure of graphite. *Phys Rev.*, 109, 272-279, 1958.
9. Geim, A. K.; Novoselov, K. S., The rise of graphene, *Nat. Mater.*, 6, 183-191, 2007.
10. Novoselov, K. S.;Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Katsnelson, M. I.; Grigorieva, I. V.; Dubonos, S. V.; Firsov, A. A., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature.*, 438, 197–200, 2005.
11. Zhang, Y.; Tan, Y.; Stormer, H. L.; Kim, P., Experimental Observation of the Quantum Hall Effect and Berry’s Phase in Graphene. *Nature*, 438, 201– 204 2005.
12. Bolotin, K. I.;Sikes, K. J.; Jiang, Z.; Klima, M.; Fudenberg, G; Hone, J.; Kim, P.; Stormer, H. L., Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Commun.*, 146, 351–355, 2008.
13. Baladin, A. A.; Ghosh, S.; Bao, W.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.;Miao, F.; Lau, C. N., Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Lett.*, 8, 902–907, 2008.



14. Changgu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, and James Hone., Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science.*, 321, 84-88, 2008.
15. Stolyarova, E.; Rim, K. T.; Ryu, S. M.; Maultzsch, J.; Kim, P.; Brus, L. E.; Heinz, T. F.; Hybertsen, M. S.; Flynn, G. W., High-resolution Scanning Tunneling Microscopy Imaging of Mesoscopic Graphene Sheets on an Insulating Surface. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 9209-9212, 2007.
16. Ferrari, A. C, Meyer, J. C, Scardaci, V, Casiraghi, C, Lazzeri, M, Mauri, F, Piscanec, S, Jiang, D, Novoselov, K. S, Roth, S, Geim, A. K., Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys. Rev. Lett.*, 97, 187401-187404, 2006.
17. Zhu, Y.; Murali, S.; Cai, W.; Li, X.; Suk, J. W.; Potts, J. R.; Ruoff, R. S., Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties and Applications *Adv. Mater.*, 22, 3906-3924, 2010.
18. S. Russo et al., Contact Resistance in Graphene-Based Devices. *Physica E.*, 42, 677-679, 2010.
19. K. Nagashio et al., Metal/Graphene Contact as a performance killer of ultrahigh Mobility Graphene Analysis of Intrinsic Mobility and Contact Resistance. *IEEE.*, 9, 565-568, 2009.
20. A. Conwill., Contact Resistance of Graphene-Based Devices by TLM. *NNIN REU*, 88-89, 2010.
21. K. Nagashio et al., Contact resistivity and current flow path at metal/graphene contact. *Appl. Phys. Lett.*, 97, 1-5, 2010.
22. A. Venugopal et al., contact resistance in few and multi layer graphene devices. *App. Phys. Lett*, 96, 013512, 2010.
23. Fengnian Xia et al., The Origins and Limits of Metal-Graphene Junction resistance. *Nature.*, 10, 179-184, 2011.
24. Joshua A. Robinson et al., Contacting Graphene. *App. Phys. Lett*, 98, 1-3, 2011.
25. K. Nagashio et al., Is Graphene Contacting with Metal Still Graphene. *IEEE.*, 11, 27-30, 2011.
26. Joachim Knoch et al., Properties of Metal-Graphene Contacts. *IEEE.*, 11, 513-519, 2012.
27. K. Nagashio et al., Intrinsic graphene/metal contact. *IEEE.*, 12, 68-71, 2012.

28. Eiichiro Watanabe et al., Low Contact Resistance Metals for Graphene Based Devices. *Diamond&Related Mat*, 24, 171-174, 2012.
29. J.S.Moon et al., Ultra-low Resistance Ohmic Contacts in Graphene Field Effect Transistors. *App. Phys. Lett*, 100, 1-3, 2012.
30. Osman Balcı and Coşkun Kocabaş., Rapid Thermal Annealing of Graphene-Metal Contact. *App. Phys. Lett*, 101, 1-5, 2012.
31. Jahanna Anteroinen et al., Extraction of Graphene-Titanium Contact Resistances using Transfer Length Measurement and Curve-Fit Method. *Word Academy of Science*, 68, 1720-1723 2012.
32. A.Di Bartolomeo et al., Effect of Back-gate on Contact Resistance and on Channel Conductance in Graphene-Based Field Effect Transistors. *Diamond& Related Materials*, 38, 19-23, 2013.
33. Virendra Singh et al., Graphene Based Materials: Past, Present and Future. *Progress in Materials Science.*, 56, 1178–1271,2011.
34. Wallace, P. R., The Band Theory of Graphite. *Phys. Rev*, 71, 622, 1947.
35. Charlier, J.-C.; Eklund, P.C.; Zhu, J. and Ferrari, A.C., Electron and Phonon Properties of Graphene. *Springer-Verlag.*, 111, 673-709, 2008.
36. Semenoff, G. W., Condensed-Matter Simulation of a Three-Dimensional Anomaly. *Phys. Rev. Lett*, 53, 2449-2452, 1984.
37. Avouris, P., Chen, Z., and Perebeinos, V., Carbon-Based Electronics. *Nat. Nanotechnol*, 2, 605, 2007.
38. Geim, A. K. and Novoselov, K. S., The Rise of Graphene. *Nature*, 6,183-191, 2007.
39. Novoselov, K. S. et al., Two-dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene. *Nature.*, 438, 197-200, 2005.
40. Morozov, S.V. et al., Giant Intrinsic Carrier Mobilities in Graphene and Its Bilayer. *Review Letters.*, 100, 016602, 2008.
41. Chen, J. H. et al., Intrinsic and Extrinsic Performance Limits of Graphene Devices on SiO<sub>2</sub>. *Nat. Nanotechnol*, 3, 206-209, 2008.
42. Akturk, A. and Goldsman, N., Electron Transport and Full-Band Electron-Phonon Interactions in Graphene. *App. Phys. Lett*, 103, 1-8, 2008.

43. Neil Savage., Super Carbon. *Nature*, 483, 30-31, 2012.
44. M.S.Fuhrer., Physicists Show Electrons Can Travel More Than 100 Times Faster in Graphene. *Applied Physics*,104,024510, 2008.
45. Chen, J. H. et al., Charged Impurity Scattering in Graphene. *Nature*, 4, 377–381, 2008.
46. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Electric field effect in atomically thin carbon flims, *Science*, 306, 666-669, 2004.
47. Jung, I., Optical and Electrical Characterization of Graphene-Based Material. Degree Doctor of Philosopy. Northwestern University, 2007.
48. Hadar Steinberg, Gilad Barak, Amir Yacoby, et al., Charge Fractionalization in Quantum Wires. *Nature*, 4, 116–119, 2008.
49. Jiannis K. Pachos., Manifestations of Topological Effects in Graphene. *Contemporary Physics*, 50, 375-380, 2009.
50. Agung Trisetyarso., Dirac Four-Potential Tunings-Based Quantum Transistor Utilizing the Lorentz Force. *Quantum Information & Computation*, 12, 989-994, 2012.
51. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov., Two-dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene, *Nature*, 438, 197–200, 2005.
52. A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim., The electronic properties of graphene, *Rev. Modern Phys*, 81, 109–162, 2009.
53. I. Meric, N. Baklitskaya, P. Kim, and K. L. Shepard., RF Performance of Top-Gated Graphene Field-Effect Transistors, in *Proc. IEEE Int. Electron Dev. Meet*, 1-4, 2008.
54. Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H. Y. Chiu, A. Grill, and P. Avouris., 100-GHz Transistor From Wafer-Scale Epitaxial Graphene, *Science*, 327, 662-666, 2010.
55. Z. Chen, J. Appenzeller, J. Knoch, Y.-M. Lin, and P. Avouris., The Role of Metal-Nanotube Contact in the Performance of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors, *Nano Lett*, 5, 1497–1502, 2005.
56. N. Nemeč, D. Tomanek, and G. Cuniberti., Contact Dependence of Carrier Injection in Carbon Nanotubes, *Phys. Rev. Lett*, 96, 1-4, 2006.

57. J. Knoch and J. Appenzeller., Tunneling Phenomena in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors, *Phys. Stat. Solidi A*, 205, 679–694, 2008.
58. H. Ghoneim, J. Knoch, H. Riel, D. Webb, M. T. Bjoerk, S. Karg, E. Loertscher, H. Schnit, and W. Riess., Suppression of ambipolar behavior in metallic source/drain metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, *Appl. Phys. Lett*, 95, 1-3, 2009.
59. Giovannetti, G et al., Doping Graphene with Metal Contact. *Phys.Rev.Lett*, 101, 026803, 2008.
60. Robinson, J.A., Thompson, D.A., LaPierre, R.R., GaAs Core-Shell Nanowires for Photovoltaic Applications. *Nano Lett*, 9,148-154, 2009.
61. Z.A. Weinberg, W.C. Johnson, and M.A. Lampert., High-Field Transport in SiO<sub>2</sub> on Silicon Induced by Corona Charging of the Unmetallized Surface, *J. Appl. Phys*, 47, 248–255, 1976.
62. D.A. Bonnell., *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*, 2nd Ed, Wiley VCH, New York. 1, 23-38, 2001.
63. G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel., Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, *Phys. Rev. Lett*, 49, 57–60, 1982.
64. R. Young, J. Ward, and F. Scire., The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography, *Rev. Sci. Instrum*, 43, 999–1011, 1972.
65. T.J. Shaffner., Characterization Challenges for the ULSI Era, in *Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials and Devices*. Electrochem. Soc., Pennington, 97, 1–15, 1997.
66. R.J. Hamers and D.F. Padowitz., Methods of Tunneling Spectroscopy with the STM, in *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*, 2nd Ed., New York., Ch, 4. 2001.
67. R.L. Smith and G.S. Rohrer., The Preparation of Tip and Sample Surfaces for Scanning Probe Experiments, in *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*, 2nd Ed., New York, Ch. 6, 2001.
68. E. Meyer, H.J. Hug, and R. Bennewitz., *Scanning Probe Microscopy*, Springer, Berlin., 15-24, 2004.
69. J. Simmons., Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect Between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film, *Appl. Phys*, 34, 1793–1803, 1963.

70. G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber., Atomic Force Microscope, *Phys. Rev. Lett*, 56, 930–933, 1986.
71. D. Sarid., *Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic, and Atomic Forces*, Revised Edition, Oxford University Press, New York., 129-151, 1994.
72. G. Meyer and N.M. Amer., Novel Optical Approach to Atomic Force Microscopy, *App. Phys. Lett*, 53, 1045–1047, 1988.
73. Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller, and V.B. Elings., Fractured Polymer/Silica Fiber Surface Studied by Tapping Mode Atomic Force Microscopy, *Surf. Sci. Lett*, 290, 668–692, 1993.
74. P. Eyben, S. Denis, T. Clarysse, and W. Vandervorst., Progress Towards a Physical Contact Model for Scanning Spreading Resistance Microscopy, *Mat. Sci. Eng.B*, 102, 132–137, 2003.
75. W.J. Kaiser and L.D. Bell., Direct Investigation of Subsurface Interface Electronic Structure by Ballistic-Electron-Emission Microscopy, *Phys. Rev. Lett*, 60, 1406–1410, 1988.
76. M. Prietsch., Ballistic-Electron Emission Microscopy (BEEM): Studies of Metal/Semiconductor Interfaces With Nanometer Resolution, *Phys. Rep*, 253, 163–233, 1995.
77. Park S, Ruoff RS., Chemical Methods for the Production of Graphenes. *Nature Nanotechnol*, 4, 217-224, 2009.
78. Berger C, Song Z, Li T, Li X, Ogbazghi AY, Feng R, Dai Z, Alexei N, Conrad MEH, First PN, De Heer WA., Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route Toward Graphene-Based Nanoelectronics. *J Phys Chem B*, 108, 19912, 2004.
79. Lee DS, Riedl C, Krauss B, Klitzing KV, Starke U, Smet JH., Raman Spectra of Epitaxial Graphene on SiC and of Epitaxial Graphene Transferred to SiO<sub>2</sub>. *Nano Lett*, 8, 4320, 2008.
80. Unarunotai S, Murata Y, Chialvo CE, Kim HS, MacLaren S, Mason N, Petrov I, Rogers JA., Transfer of graphene layers grown on SiC wafers to other substrates and their integration into field effect transistors. *Appl Phys Lett*, 95, 202101, 2009.
81. 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 Lett*, 9, 1937-1943, 2009.
82. LiU, Z. Y., Srot, V., and Yang, J. C., Self-Assembled Crystalline Silicon Carbide Y Junctions by Coalescence of Nucleated Iron Catalysts, *App. Phys. Lett*, 90, 2010.
83. Reina, A., Jia, X. T., Ho, J., et. al., Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor deposition, *Nano Lett*, 9, 30-35, 2009.
84. K. Yu, J. Lian, S. Siriponglert, H. Li, Y. P. Chen, and S. S. Pei., Graphene Segregated on Ni Surfaces and Transferred to Insulators, *App. Phys. Lett*, 93, 1-5, 2008.
85. 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 Lett*, 9, 4268- 4272, 2009.
86. 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 Films on Copper Foils, *Science*, 324, 1312-1314, 2009.
87. Park JS, Reina A, Saito R, Kong J, Dresselhaus G, Dresselhaus MS., G' band Raman Spectra of Single, Double and Triple Layer Graphene. *Carbon*, 47,1303-1310, 2009.
88. Ferrari AC, Meyer JC, Scardaci V, Casiraghi C, Lazzeri M, Mauri F, et al., Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys Rev Lett*, 97, 187401, 2006.
89. Calizo I, Balandin AA, Bao W, Miao F, Lau CN., Temperature dependence of the Raman spectra of graphene and graphene multilayers. *Nano Lett*, 7, 2645-2650, 2007.
90. Campbell, S. A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford University., New York, 151, 2001.
91. Dill, F. H., *Optical Lithography*, IEEE, 7, 440-444, 1975.
92. Mack, C. A., PROLITH: A comprehensive optical lithography model, *Proceeding of SPIE.*, 538, 207-220, 1985.
93. Zant, P. Van, *Microchip Fabrication*, Mc Graw-Hill, Third Edition, 399-404, 1997.

94. D.Graf, et al., Spatially Resolved Raman Spektroskopy of Single- and Few Layer Graphene. Nano Lett, 7,238-242, 2006.

## ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Sakarya’da doğan Enes YAYAN, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Hacıkadirler İlköğretim Okulu ve Gümüşova (YDA) Lisesinde tamamlamıştır. 2007 yılında kazandığı Bozok Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü 2011 yılında başarıyla bitirmiştir.

2012 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başlamıştır.

### İletişim Bilgileri

Adres: Aşağı nohutlu Mah. Boztepe Apt. A Blok 1/2

66100 YOZGAT

Telefon: (537) 681 17 54

E-posta: enesyayan89@gmail.com