



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



GRAFEN TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

Merve AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım - 2021

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve AKIN tarafından hazırlanan "GRAFEN TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER" adlı tez çalışması 24/11/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Zafer ARICAN

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Merve AKIN

Tarih: 24/11/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN TABANLI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖRLER

Merve AKIN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2021, 64 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

Dr. Öğr. Üyesi Zafer ARICAN

Grafen özellikle son zamanlarda üzerinde oldukça konuşulan konulardan birisi haline gelmiştir. Keşfedilen ilk 2 boyutlu kristal olması, dünyada elde edilen en ince nesne olması, bilinen en iyi iletken olması gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Malzeme bilimindeki baş döndürücü gelişmelerden birisi olarak nitelendirilen grafen, ‘geleceğe yön veren malzeme’ olarak adlandırılmaktadır. Gelecekte grafen maddesinin temiz bir enerji ihtimalini yükselttiği bilim insanları tarafından vurgulanmıştır. Grafen kullanılarak üretilen transistörlerin daha az moleküler kusura ve üstün iletkenlik gibi özelliklere sahip olmasından ötürü günümüzde kullanılan transistörlere göre daha çok ön plana çıkmaktadır. GFET’lerdeki kanallar, fotosensing, manyetik algılama ve biyosensing gibi çok çeşitli uygulamalarda yararlanılabilecek benzeri görülmemiş bir hassasiyete sahiptir. Grafen sayesinde hacimsiz, kağıt kadar ince bükülebilen telefonlara, savaş sanayisinde kullanılacak, insanlığın elde edebileceği her ısıya dayanıklı zırh, kalkan vb. teknolojisine ve

elikten 300 kat daha sağlam olması nedeniyle, daha sağlam ve hafif hava araçlarına ulaşabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada iki boyutlu malzeme olan grafen temelli alan etkili transistör (FET) retimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu retim için özgün bir tasarım gerçekleştirilmiştir ve bu tasarımın gerçekleştirilmesi için gerekli PCB kartın tasarlanmıştır. Ucuzluğun n planda olması nedeniyle tasarımın baskı devre kartı üzerinde oluşturulması planlanmıştır. İki boyutlu malzeme olan grafenin retimi CVD cihazında oluşturulmuştur. Grafenin retim aşamaları tamamlandıktan sonra PCB zerine transfer aşaması gerçekleştirilmiştir. Ancak grafen malzemesi PCB kartının yüzeyindeki pürüzlülük nedeniyle düzgün yerleşme ve kontak alma konusunda ciddi problemlere neden olmuştur. Bu problemlerden ötürü cihazın ölümleri tamamlanmış fakat istenilen elektriksel ölümlere ulaşılamamıştır. Yapılan bu ucuz yollu kullan-at sensörlerin gelecekte yapılacak olan sensör çalışmalarına alt yapı oluşturması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Grafen, Grafen FET, İki Boyutlu Malzeme, PCB

ABSTRACT

MS THESIS

GRAPHENE BASED FIELD-EFFECT TRANSISTORS

Merve AKIN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2021, 64 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Instructor Member Hakkı SOY

Dr. Instructor Member Zafer ARICAN

Graphene has become one of the most talked about topics, especially recently. It stands out with its features such as being the first 2 dimensional crystal discovered, being the thinnest object obtained in the world, and being the best conductor known. Graphene, which is described as one of the dizzying developments in materials science, is called the "material that shapes the future". Scientists have emphasized that graphene raises the possibility of a clean energy in the future. Transistors produced using graphene are more prominent than the transistors used today, due to their less molecular defects and superior conductivity. Channels in GFETs have an unprecedented sensitivity that can be exploited in a wide variety of applications such as photosensing, magnetic sensing and biosensing. Thanks to graphene, phones that can be bent as thin as paper, without volume, to be used in the war industry, armor, shields, etc., which are resistant to every heat that humanity can

obtain. It is predicted that it can reach more robust and lighter aircraft due to its technology and being 300 times stronger than steel.

In this study, the production of graphene-based field-effect transistor (FET), which is a two-dimensional material, was tried to be realized. An original design has been realized for this production and the necessary PCB board has been designed for the realization of this design. It is planned to create the design on the printed circuit board due to the low cost. The production of graphene, a two-dimensional material, was created in the CVD device. After the production stages of graphene were completed, the transfer stage was carried out on the PCB. However, graphene material caused serious problems in proper placement and contacting due to the roughness of the PCB board's surface. Due to these problems, the measurements of the device were completed, but the desired electrical measurements could not be reached. It is aimed that these cheap way disposable sensors will form the infrastructure for future sensor studies.

Keywords: Graphene, Graphene FET, Two Dimensional Material, PCB

ÖNSÖZ

Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmamda danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarım süresince değerli yardımlarını esirgemeyen ve destek olan Sayın Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım süresince bana laboratuvarında çalışma imkanı sunan ve manevi destekçim olan saygıdeğer Doç. Dr. Mücahit YILMAZ hocama da teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da aileme bu süreçte bana destek oldukları için teşekkür ederim.

Merve AKIN

KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| ÖNSÖZ | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xi |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Tezin Amacı | 2 |
| 1.2. Grafen | 2 |
| 1.2.1. Grafenin Fiziksel Özellikleri | 4 |
| 1.2.2. Grafenin Elektriksel Özellikleri | 4 |
| 1.2.3. Grafenin Optik Özellikleri | 6 |
| 1.2.4. Grafenin Kimyasal Özellikleri | 7 |
| 1.2.5. Grafenin Isıl Özellikleri | 7 |
| 1.2.6. Grafenin Kullanım Alanları | 7 |
| 1.2.6.1. Elektronik | 8 |
| 1.2.6.2. Sağlık | 9 |
| 1.2.7. Grafenin Üretim Yöntemleri | 12 |
| 1.2.7.1. Eksfoliasyon | 12 |
| 1.2.7.2. Kimyasal Buhar Biriktirme | 12 |
| 1.2.7.3. Grafen Oksitin İndirgenmesi | 16 |
| 1.2.7.4. Epitaksiyel Büyütme | 16 |
| 1.3. Alan Efekti Transistörleri (FET) | 17 |
| 1.3.1. GFET Konfigürasyonu | 17 |
| 1.3.1.1. Arka Kapılı GFET'ler | 18 |
| 1.3.1.2. Üst Kapılı GFET'ler | 18 |
| 1.3.1.3. Arka ve Üst-İki Kapılı GFET'ler | 19 |
| 1.3.2. Grafen FET Çeşitleri | 19 |
| 1.3.2.1. Tek Katmanlı GFET'ler | 20 |
| 1.3.2.2. İki Katmanlı GFET'ler | 20 |

| | |
|---|----|
| 2. TASARIM VE ÜRETİM PLANLAMA | 22 |
| 2.1. Grafen FET Tasarımı | 22 |
| 2.2. Grafen FET Üretim Aşamaları | 23 |
| 2.3. Baskı Devre Kart Tasarımı | 23 |
| 3. ÜRETİM AŞAMALARI VE UYGULAMALAR | 26 |
| 3.1. Tek Tabakalı Grafenin Üretim Aşamaları | 26 |
| 3.1.1. Metal Alttaşın Hazırlanması | 26 |
| 3.1.2. Tek Tabakalı Grafen Üretimi | 29 |
| 3.1.3. Baskı Devre Kartındaki Metal Bacakların Termal Buharlaştırma Cihazında Kaplanması | 30 |
| 3.1.4. Üretilen Grafenin Transferi | 32 |
| 4. TESTLER | 39 |
| 4.1. Raman Karakterizasyonu | 39 |
| 4.2. Elektriksel Ölçüm | 41 |
| 5. SONUÇLAR | 44 |
| 5.1. Tezin Amacının Doğrulanması | 44 |
| 5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler | 44 |
| KAYNAKLAR | 46 |
| ÖZGEÇMİŞ | 49 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| 1.1 Transistör [1] | 1 |
| 1.2 Grafen [2] | 3 |
| 1.3 Karbon Allotroplarının Moleküler Yapısı [4] | 4 |
| 1.4 Grafenin 2D Yapısı [6] | 5 |
| 1.5 Grafen Tabakadan 0D Fulleren, 1D Karbon Nanotüp ve 3D Grafitin Oluşması [9] | 5 |
| 1.6 İletkenliğin Gate Gerilimine Göre Değişimi [11] | 6 |
| 1.7 Grafen Sensörler [13] | 8 |
| 1.8 Grafen Sensör [13] | 11 |
| 1.9 Eksfoliasyon [17] | 13 |
| 1.10 CVD ile Grafen Tabakaların Üretimi [17] | 13 |
| 1.11 CVD Mekanizması [18] | 14 |
| 1.12 Grafen Transfer Aşamalarının Şematik Gösterimi [19] | 15 |
| 1.13 Grafen Oksit [17] | 16 |
| 1.14 Epitaksiyel Büyütme [17] | 17 |
| 1.15 FET Yapısı [21] | 18 |
| 1.16 (a) Arka Kapılı Grafen Transistör; (b) Çift Kapılı Grafen Transistör; (c) SiC ve Transistör Yapısından Epitaksiyel Grafen Oluşumu [22] | 19 |
| 1.17 Tek Katmanlı GFET Yapısı [24] | 20 |
| 1.18 İki Katmanlı GFET Yapısı [24] | 21 |
| 2.1 Tasarlanan GFET Yapısı | 23 |
| 2.2 Basımı Yapılmış Baskı Devre Kartı | 24 |
| 2.3 Baskı Devre Kartı Üzerindeki Metal Bacakların Gümüş ve Altın Kaplanmış Hali | 25 |
| 3.1 Kimyasal Buhar Biriktirme ile Grafen Üretiminin Şekilsel Gösterimi [30] | 26 |
| 3.2 Bakırların Elektrolize Hazırlanması | 27 |
| 3.3 Bakır Alttaşın Elektrolizi | 28 |
| 3.4 Bakırların Kuvarz Zemine Yerleştirilmesi | 29 |
| 3.5 MTI-OTF 1200 Düşük Basınçlı Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Cihazı | 30 |
| 3.6 Termal Buharlaştırma Cihazı | 31 |
| 3.7 Proses Halinde İken Termal Cihaz İçerisindeki Görünüm | 32 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.8 | Grafen Transfer Şeması [32] | 33 |
| 3.9 | Fotorezist Kaplama Yapılmadan Önce Grafenler | 34 |
| 3.10 | Fotorezist Kaplı Grafenler | 34 |
| 3.11 | Fotorezist Kaplı Grafenlerin Fotorezist Tabakasının Çözdürülmesi | 35 |
| 3.12 | Fotorezist Kaplı Grafenlerin Amonyum Peroksidisülfat Çözeltilisinde Beklemesi .. | 36 |
| 3.13 | Grafenin Baskı Devre Kartı Üzerine Transferi | 37 |
| 3.14 | Transfer Sonrası Fotorezistin Aseton İçinde Çözdürülmesi | 37 |
| 3.15 | Transferi Yapılmış Olan Baskı Devre Kartları | 38 |
| 4.1 | Raman Spektrometresi | 40 |
| 4.2 | Bakır Haldeki Grafenin Raman Görüntüsü | 41 |
| 4.3 | Direnç Ölçümü | 43 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

OD : Sıfır Boyutlu

1D : Bir Boyutlu

2D : İki Boyutlu

3D : Üç Boyutlu

S : Source

D : Drain

G : Gate

A : Akım

mV : Milivolt

meV : Mili Elektronvolt

nm : Nanometre

σ : sigma

π : pi

dk : Dakika

cm² : Santimetrekare

μ m : Mikrometre (Mikron)

sccm : System Center Configuration Manager

DC : Doğru Akım

PCB : Baskı Devre Kartı

FET : Alan Etkili Transistör

GFET : Grafen Temelli Alan Etkili Transistör

RF : Radyofrekans

GO : Grafen Oksit

CVD : Kimyasal Buhar Biriktirme

IPA : Isopropyl Alcohol

DI : Deionized Water

PMMA : Polimetil Metakrilat

C : Karbon

O : Oksijen

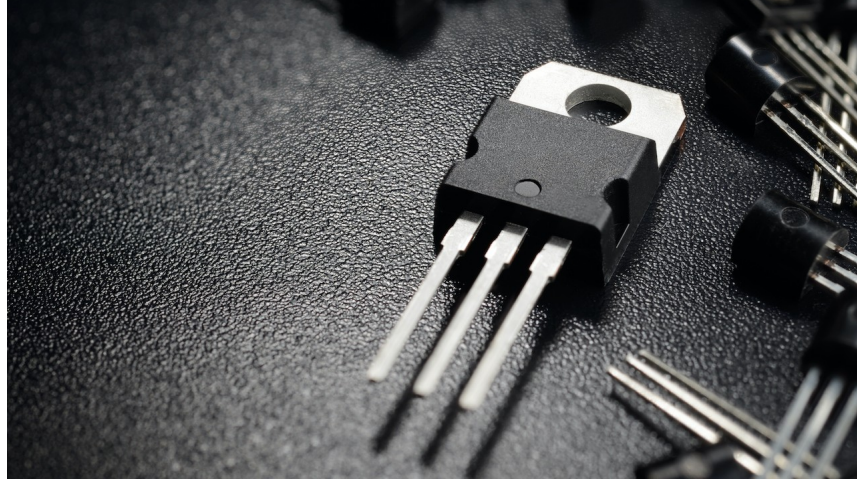
Ge : Germanyum

Ar : Argon
Au : Altın
Ag : Gümüş
Cr : Krom
Ti : Titanyum
Cu : Bakır
Ni : Nikel
N : Nitrojen
Si : Silisyum
°C : Derece Santigrat
 CH_4 : Metan
 H_2 : Hidrojen
 Al_2O_3 : Alüminyum Oksit
SiO : Silisyum Dioksit
SiC : Silisyum Karbür
FeCl : Demir(III) Klorür
TiC : Titanyum Karbür
TiN : Titanyum Nitrür
TiCN : Titanyum Karbon Nitrit

1. GİRİŞ

Transistör, 20. yüzyılın en büyük buluşlarından birisi olarak kabul edilmektedir. Elektronik dünyasında çığır açan bir yenilik olarak görülen transistörün ilk icadı aslında transistörün kendisi değildi ancak onun ana hatlarını oluşturuyordu. İlk patent başvurusu, bakır sülfürden oluşan üç elektrota sahip bir buluş olmakla beraber, yapan fizikçi Julius Lilienfeld'dir [1].

Patentin verilmesinden 20 yıl sonra Bell kuruluşları, bu icadı geliştirmeye başladı. Bell, John Bardeen ve Walter Brattain'in oluşturduğu bir ekip kurdu ve ikili, termiyonik adı verilen vakum lambalarının yerini alabilecek bir devre için çalışmalara başladı. Bu ekip henüz bir yıl geçmeden yarı iletken olan germanyum elementinin ileride transistör adını alacak olan yükseltme devresi için kullanılabileceğini keşfetti ve hem fazla enerji tüketimine neden olan hem de oldukça büyük boyutlarda yer kaplayan vakum lambalarının yerini daha küçük boyutlardaki transistörler aldı. Aşağıda bulunan Şekil 1.1'de transistörün yapısı gösterilmiştir [1].



Şekil 1.1. Transistör [1]

Transistör, gerilimleri kontrol edebilen ve elektronik devrelerde dolaşan küçük devre akımlarını yükseltip alçatabilen yarı iletken bir devre elemanıdır. Kablolar ve devre yollarındaki elektronları kontrol edebilme özelliğine sahip oldukları için elektriği de kontrol eden cihazlar olarak tanınır. Aynı zamanda, devrelerde anahtarlama görevini de yerine

getirebilmektedir [1]. Transistör, yalnızca akımı iletmekle kalmaz, aynı zamanda devre kartından geçen gücü yükseltip azaltmanıza da olanak sağlar. Transistörlerin devre kartında genellikle 3 bacağı bulunmaktadır. Bu bacaklardan birisine uygulanan akım ile diğer bacaklar arasındaki mevcut elektrik akımı, hassas bir şekilde kontrol edilebilir haldedir.

Günümüzde ise transistörlerin boyutu nanometre boyutuna kadar küçülmüş haldedir ve bir çip üzerinde milyarlarca transistör bulunmaktadır. Transistörlerin boyutlarının küçültülmeye devam etmesi gerekmektedir ancak silisyum yarıiletkeniyle bunun daha fazla mümkün olmayacağı bilinen bir gerçektir. Bu sebepten dolayı bilim dünyası başka malzemelere yönelmek zorunda kalmıştır [1].

2004 yılında grafenin bulunmasıyla birlikte grafenin gelecekte silisyumun yerini alması öngörülmektedir. Silisyumun sınıra ulaştığı fikri ve grafenin bulunması ile grafen temelli alan etkili transistörler üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Grafen gibi iki boyutlu malzemelerin transistör üretiminde kullanılıyor olmasının birden çok sebebi bulunmaktadır. Bunların en önemlileri, yüksek mekaniksel dayanıklılığı, çok yüksek elektron hareketliliği, yüksek derecede termal iletkenliği, esnekliği ve küçük boyutlu oluşudur [1].

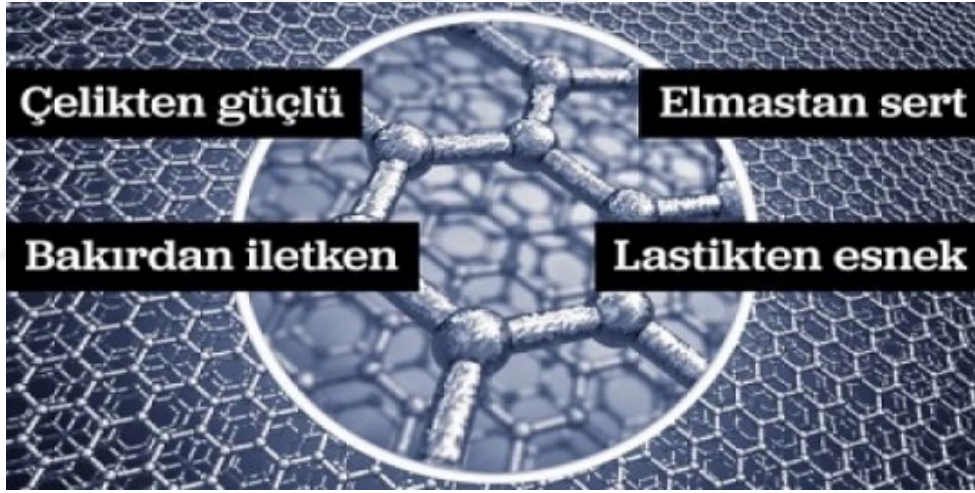
1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında üniversitemizde iki boyutlu malzemeler kullanılarak baskı devre kartı yardımıyla transistör üretilmesi hedeflenmiştir. Yapılan bu çalışma ile hem üniversitemizin Fizik Bölümü'ne ait olan laboratuvarın imkanlarından faydalanılmaya çalışılmış hem de temiz alanın üretim kabiliyetinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmadaki en önemli nokta ise ucuz yollu, grafen tabanlı kullan-at sensörler elde etmektir. Bu çalışma sonrasında üretilecek olan Grafen FET ile gelecekte üretimi yapılması muhtemel olan sensör gibi uygulamaların altyapısı da sağlanmış olacaktır.

Baskı devre kartı üzerine grafen konularak bölümümüzde yeni bir tasarımın altı çizilmiştir. Bu tasarım ile hem zamandan tasarruf etmiş olup hem de maddi açıdan kazanç sağlanmıştır. Baskı devre kartının üretim kolaylığı ve uyumluluğu sayesinde olası hatalar minimuma indirilmiştir. Bunların yanı sıra kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile elde ettiğimiz iki boyutlu malzemenin transferi gibi üretim süreçlerinden elde edilen deneyimler daha sonraki çalışmalarda kullanılabilir olacaktır.

1.2. Grafen

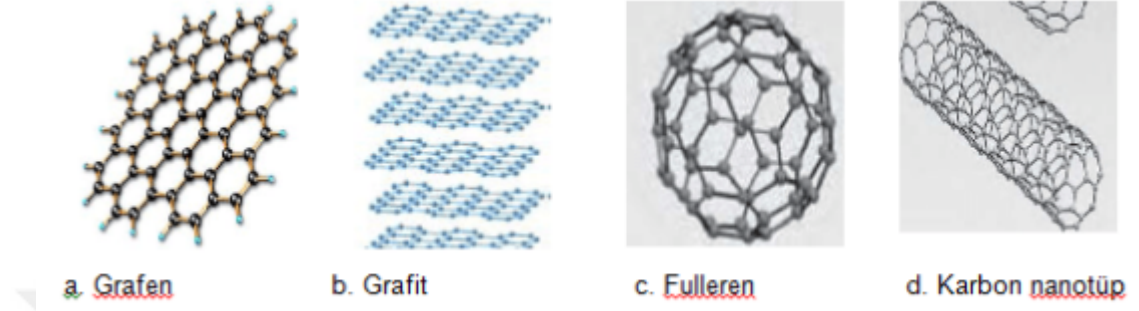
Grafen, karbon atomunun bal peteği şeklindeki yapılarından bir tanesine verilen addır. Kurşun kalemlerin içindeki grafit, grafen tabakalarının üst üste binmesinden oluşmuştur. Grafen istenilen özelliğe göre; hafif, sağlam, süper iletken, esnek veya çok sert, kimyasal değişime de uygun olabilir. Bu özellikler uzayabilen esnek ve dayanıklı malzeme yapımında oldukça işe yarar. Grafenin güçlü karbon bağlara sahip olması ona yeryüzündeki bilinen en sağlam malzemelerden biri olma özelliğini kazandırmıştır. Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmesiyle oluşan grafen, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmaktadır. Elektronlar bu tek atom kalınlığındaki karbon tabakası içerisinde kütleleri yokmuş gibi hızlı hareket edebilirler. Aşağıda görülen Şekil 1.2'de grafenin iki boyutlu altıgen yapısı görülmektedir [2].



Şekil 1.2. Grafen [2]

Karbon atomlarının farklı dizilişleri sonucunda birbirinden farklı yapılar oluşmaktadır. Elmasta ve grafitte olduğu gibi grafen de bir karbon allotropudur. Grafen, sp , sp^2 ve sp^3 hibritleşmesi yapabilen karbon elementinin bir allotropu olan grafitin tek bir tabakasına verilen isim olarak tanımlanmaktadır. Grafen tabakasındaki C atomları, komşu üç C atomu ile sp^2 hibritleşmesi yaparak σ bağı oluşturur. Arda kalan p_z orbitalleri bağı oluştururlar. π bağları grafen tabakasında elektrik iletimini sağlayan valans elektronlarını içermektedir [3].

Kusursuz grafenler tamamıyla altıgen hücrelerden oluşurlar; beşgen ve yedigen hücreler yüzey üzerindeki hatalar olarak kabul görür. İzole edilmiş bir beşgen hücre varsa bu zamanla konik bir şekil alır. Aynı şekilde yedigen bir hücre de semer şekilli bir yapı haline dönüşür. Beşgen ve yedigen hücrelerin kontrollü birleşimleri ile değişik şekiller elde edilebilmektedir. Şekil 1.3’de karbon allotroplarının moleküler yapıları gösterilmiştir [4].



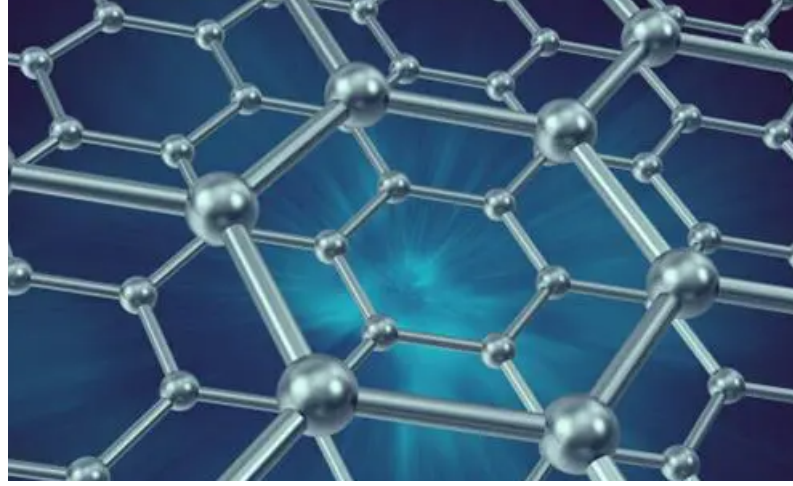
Şekil 1.3. Karbon Allotroplarının Moleküler Yapısı [4]

1.2.1. Grafenin Fiziksel Özellikleri

Grafen dünyanın en ince malzemelerinden birisi olarak tanımlanmaktadır. Bir karbon atomunun kalınlığı ile aynı kalınlığa sahiptir (yaklaşık 0,34 nm). Çelik ve elmadan çok daha sert olan 2D bir malzemedir. Gerilme dayanıklılığı da oldukça yüksek olarak belirtilmektedir [5].

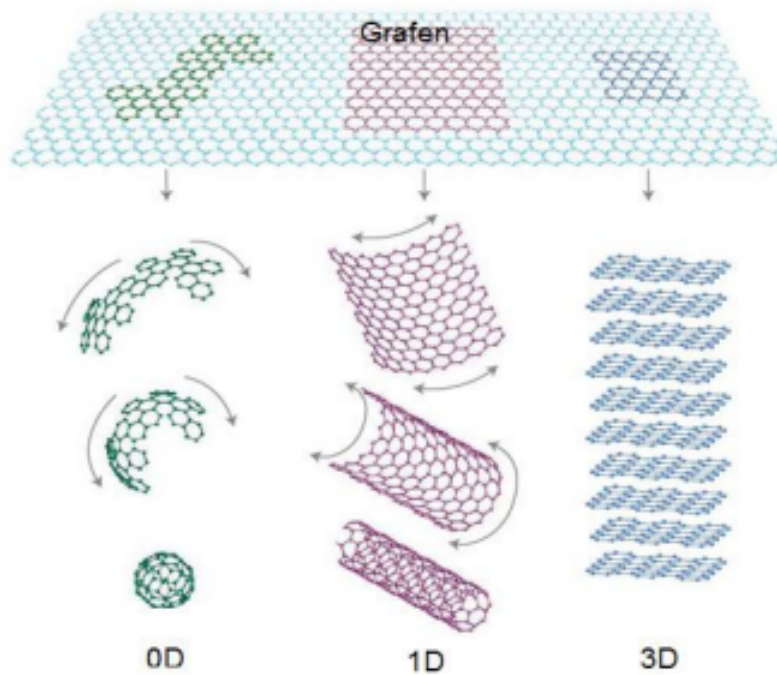
1.2.2. Grafenin Elektriksel Özellikleri

Grafenin elektriksel iletkenliği, diğer tüm malzemelerden daha yüksektir. Grafen, sıfır enerji band boşluğuna sahiptir bu nedenle, grafen yapısı içerisinde elektronlar valans bandından iletkenlik bandına doğru kolayca hareket edebilirler. Şekil 1.4’de grafenin iki boyutlu yapısı görülmektedir [6].



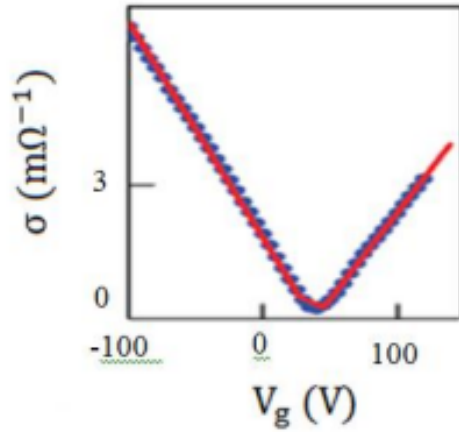
Şekil 1.4. Grafenin 2D Yapısı [6]

Grafen; sıfır boyutlu fullerenleri, bir boyutlu karbon nanotüpleri ve üç boyutlu grafiti oluşturan madde olmuştur [7]. Bunlar arasındaki özellikle karbon nanotüplerin göstermiş oldukları elektriksel özellikler grafenin elektriksel özelliklerine karşı olan ilgiyi daha da artırmıştır [8]. Şekil 1.5’de grafen tabakadan oluşan farklı yapılar gösterilmiştir [9].



Şekil 1.5. Grafen Tabakadan 0D Fulleren, 1D Karbon Nanotüp ve 3D Grafitin Oluşması [9]

Grafene olan büyük ilginin asıl nedeni, bu maddenin elektriksel alan etkisi sergilemesidir. Onun elektriksel alan etkisine sahip olması bir transistör olarak kullanılacağı anlamına gelmektedir. Grafenden yapılan transistörden alınan sonuçlara göre grafenin iletkenliği gate voltajının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu durum uygulanan gate gerilimine karşılık öz direncin değiştiğini gösterir [10]. Grafen hem p-tipi hem de n-tipi yarıiletken karakteristiği gösterebilmektedir. Buradan grafenin her iki yük taşıyıcısını da içeren bir madde olduğu anlaşılmaktadır. Bu yük taşıyıcıları dışarıdan uygulanan kapı gerilimiyle kontrol edilebilmektedir. Madde içindeki elektronların (yük taşıyıcılarının) yönetilebilmesi modern elektroniğin kalbi olduğu için grafen içindeki elektronların bu farklı davranışı, silisyum tabanlı yarı iletken teknolojisinin limitlerinin daha ötesine gitmemiz konusunda bize izin vermesi beklenmektedir. Şekil 1.6'da iletkenliğin gate gerilimine göre değişim grafiği bulunmaktadır [11].



Şekil 1.6. İletkenliğin Gate Gerilimine Göre Değişimi [11]

1.2.3. Grafenin Optik Özellikleri

Grafen, oldukça ince olmasına rağmen görülebilir bir malzemedir ve beyaz ışığın %2.3'nü absorbe etmektedir. Bu oran 2 boyutlu bir malzeme için oldukça yüksektir. Bu özellik, grafenin muhteşem elektriksel özellikleriyle bir arada değerlendirildiğinde, grafenin teorik olarak çok verimli solar hücreler yapımında kullanılabilmesine olanak sağlar [5].

Tüm bunların yanı sıra, görünür ışığın %2.3'nü absorbe etmesine rağmen grafen insan gözü için halen daha transparan haldedir. Bu da transparan iletken gibi malzemelerin yapısında kullanılabilmesine katkı sağlar [5].

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

1.2.4. Grafenin Kimyasal Özellikleri

Grafenin tüm atomları çevre ortamına maruz kalmasına rağmen diğer atomlarla kolaylıkla tepkimeye girmez. Ancak grafen diğer atom ve molekülleri absorbe edebilme yeteneğine sahiptir. Bu da elektronik özellikler üzerinde değişikliklere neden olmuş olur ve sensör yapımı ya da diğer uygulamalarda kullanılabilir [5].

1.2.5. Grafenin Isıl Özellikleri

Grafen, düşük ısıl genişleme katsayısı ve güçlü karbon-karbon kovalent bağı sebebiyle mükemmel elektriksel ve ısıl iletkenliğe sahip bir malzemedir. Grafenin tek tabakalı yapısı sayesinde ısıl iletkenliği yüksektir ve bu nedenle elektronik ve biyomedikalik malzemelerin geliştirilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Grafenin ısıl iletkenliği oda sıcaklığında yaklaşık 5000 W/mK'dir. Bakırın oda sıcaklığında ısıl iletkenliği 401 W/mK'dir. Dolayısıyla grafen, ısıyı bakırdan 10 kata kadar daha iyi iletmektedir [6].

1.2.6. Grafenin Kullanım Alanları

Grafen oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu geniş kullanım alanlarının yanında birçok önemli konuda insanlığa yardımcı olacak uygulamaları bulunmaktadır. Şekil 1.7'de grafen sensörlerin çeşitli alanları görülmektedir [13].

Grafen sensörlerin, grafenin sahip olduğu özellik nedeniyle boyutlarının ve ağırlıklarının çok küçük boyutlarda olması, çok az enerjiye ihtiyaç duymaları ve bu nedenle



Şekil 1.7. Grafen Sensörler [13]

yıllarca ilave bir enerji gereksinimi olmadan çalışabilecek olmaları önümüzdeki yakın süreçte apayrı bir “sensor” teknolojisinin ortaya çıkmasına yol açacaktır. Bu sensörlerin kullanım alanlarının sınırını bugünden söylemek oldukça güçtür. Ancak bunların özellikle boyutları ve enerji gereksinimlerinin hemen hemen hiç olmaması, grafen sensörlerin yakın süreçte sadece dış ortamdan (çevremizden) büyük datalar olarak yaşantımıza yol vermekle kalmayıp, insan vücudunda da yoğun bir şekilde farklı fonksiyonların kontrolü için kullanılabilir [13].

Bu çalışmada gelecekte elektronik sensörler olarak kullanılabilir olan baskı devre kartı üzerinde geliştirilmiş ucuz yollu grafen tabanlı kullan-at sensör denemeleri yapılmıştır.

1.2.6.1. Elektronik

Grafen, elektronik sektöründe yenilikçi birçok özelliğe sahiptir. Sadece 0.34 nanometre kalınlığına sahiptir. Bir metrekaresi bile yalnızca 0,77 miligram olan oldukça hafif bir malzemedir. Son derece esnektir; eski şeklinin %20’si boyutlarına düşene kadar deforme olmadan katlanabilir. Çok iletken bir malzemedir; bazı yöntemler sayesinde elektriği %100 ileten bir süper iletken haline getirilebilir. Ayrıca grafen ısıyı oldukça hızlı ve her yöne iletebilmektedir. Grafenin bu üstün özellikleri sayesinde, elektronik cihazları

minyatürleştirirken esnekleştirme, iletişimi hızlı ve güvenli hale getirme yolları arayan elektronik sektörüne yeni gelişimlerin kapılarını aralamaktadır [14].

1.2.6.2. Sağlık

Grafen sensörlerin hayatımızdaki kullanım alanlarından en önemlisi sağlık alanıdır. Bu tezde yapılması planlanmış olan grafen tabanlı sensörler ile tıbbi tedaviler için kullanılan birçok uygulama alanında bu tip sensörlerin kullanılabilceği de aşğıdaki bilgilerle öngörülmektedir. Tıpta kullanılan cihazların pahalı olması ve uygulamalarının daha zor olup, zaman alması nedeniyle grafen sensörlerin tercih edilme oranları daha yüksek hale gelmiştir. Ucuz olmaları ve daha hızlı sonuçlar elde edebilir olmaları sayesinde sağlık alanı için oldukça önemli bir noktadır.

1) Bir Antikanser Ajanı Olarak Grafen

Grafen, kanser hücrelerine yapışması için kimyasal olarak modifiye edilmiş grafen parçacıklarının hastaya enjekte edilmesine dayanan bir yöntem olan kanser hücrelerini tedavi etmek için çok faydalıdır. Bu malzeme kızılötesi ışığı emdiği için, tümörün tedavi edildiği radyolojik tedavilerin ışınlanması, vücudun geri kalanını etkilemeden doğrudan hasarlı hücrelere etki ederek hastada daha az yan etkiye neden olur [15].

Bir örnek olarak, grafenin sağlıklı ve kanserli hücreler arasında nasıl ayırım yapabildiğini gözlemleyen ve böylece kanseri invaziv olmayan bir şekilde tespit etmek için çok ilginç bir olası yöntem haline gelen Illinois Üniversitesi'nden bir araştırmacı ekibinin yakın zamanda keşfidir. Yapılan testte , bilim adamları fare beyin hücrelerinden örnekler aldılar ve bunları bir grafen tabakasına yerleştirdiler. Böylece sağlıklı hücreler ile kanser hücrelerini ayırt etme yeteneğine sahip olduklarını kanıtladılar [15].

2) Sağır-Dilsiz İletişimde Grafen

Bir grup Çinli bilim insanı, işaret dilini metne ve konuşma diline çevirebilen giyilebilir, biyo-entegre bir cihaz geliştirmişlerdir. Bu cihaz, grafenin inanılmaz iletkenlik ve esneklik özelliklerini kullanmaktadır [16].

3) Grafen Bakterisit

Grafen, katmanları arasında bulunan hücre zarlarına zarar vererek bakteri, virüs ve mantar gibi mikroorganizmaların oluşumunu önlediği için oldukça iyi bir bakteri öldürücü maddedir. Grafen, Grafen Oksit ve indirgenmiş Grafen Oksit'in farklı türevleriyle karşılaştırıldığında en iyi antibakteriyel etkileri gösterir. GO aynı zamanda antibakteriyel özellikleri daha da artırmak için gümüş nanopartiküller içeren bir bileşik olarak da kullanılabilir [16].

4) İmplantlarda Grafen

Grafenin biyouyumluluğu nedeniyle, ışığı optik sinir yoluyla beyne iletilen elektriksel impulslara dönüştürerek sinyali görüntülere dönüştürür. Nöral implantlar, sinir hücreleri temel olarak bir elektrik akımı vasıtasıyla işlev gördüğünde, hasarlı organik dokuların yerini alır. Grafen, yaralı sinir devrelerinin yerine geçebilir [15].

5) Diş İmplantlarında Grafen

Bu araştırma, Alicante Üniversitesi'nde başlatılmıştır. Profesyoneller, dayanıklılığını artırmak için dental implantlarla ilgili materyallere grafen eklemenin uygulanabilirliğini değerlendirdi. Araştırma, diş implantlarının üretiminde kullanılan malzeme kıtlığını çözmek için bir alternatif olarak ortaya çıktı. Amaç, bileşimlerine grafen dahil eden reçineler ve kompozit malzemeler geliştirmektir. Çalışmanın sonuçlarından, grafen, diş implantlarıyla ilişkili bir malzeme olarak dahil edildi [15].

Daha sonraki çalışmalar, materyalin yeni uygulamalarını arar. İsveç'teki Chalmers Teknoloji Üniversitesi'nde yürütülen bir çalışma, bir dikey kıymık katmanı oluşturmak için grafen kullandı. Diş implantlarında koruyucu bir yüzey oluşturmayı başarmışlardır. Bu, bakterilerin kendisine yapışmasını önledi. Amaç, hastayı enfeksiyonlara karşı korumak, antibiyotik uygulamasını ortadan kaldırmak ve tedavi reddi riskini azaltmaktır. Grafen ile işlenen diş implantları üzerine yerleştirilen protezler, daha fazla yapısal stabilite ve esnekliğe sahip olmanın yanı sıra daha büyük bir dirence sahiptir [15]. Şekil 1.8'de grafen sensörlere ait bir görsel bulunmaktadır [13].



Şekil 1.8. Grafen Sensör [13]

6) Bir Tedavi Aracı Olarak Grafen

Grafen oksitlenmiş şekli olan grafen oksit, tıpta yeni bir teşhis ve tedavi aracı olarak kullanılabilir bir karbon maddesidir. Önceki çalışmalar, Grafenin tıbbi bir araç olarak önemini vurgulamıştır. Onu bir tedavi aracı olarak açıklamadan önce, grafenin vücudumuzu davetsiz misafirlerden koruyan bağışıklık hücreleriyle nasıl etkileşime girdiğini anlamak temel bir gerekliliktir. Işığı evcilleştirmek ve rengi değiştirmek için nanoskopik "tuğlalar" geliştiriyorlar [15].

Nature Communications'da yayınlanan çalışma verileri, insan savunma hücreleriyle daha uyumlu olmaları için onu işlevselleştirmenin önemini vurguluyor. Böylece araştırmacılar, amino gruplarıyla işlevselleştirilmiş grafenin, normal grafen oksite göre biyouyumluluğunu artırdığını bulmuşlardır [15].

7) Protezde Grafen

Kauçuk üzerindeki grafen, bu bileşik üzerindeki elektriksel uyarım, gerilimi ve gevşemeyi kontrol etmeyi mümkün kıldığı için, onu verimli bir biyonik kas için ideal bir malzeme haline getirir. Grafen, gerekli sertliği ve gücü elde etmek için atellerin (bugün alüminyum, çelik veya titanyum kullanıldığı) yapımında faydalıdır [15].

8) Su Arıtmada Grafen

Grafen tabakaları, suyu verimli bir şekilde arıtmak için daha verimli ve daha ucuzdur. Bu tabakalar, kirliliklerin içinden geçmesine izin vermez, ancak suyun içinden

geçmesine izin verir. Grafen'in Su Arıtma için kullanımı, temiz suya erişimi olmayan ve çeşitli hastalıklardan etkilenen dünya insanlarına temiz ve saf su sağlamak için önemli bir uygulamadır [15].

9) DNA Dizilişinde Grafen

Genetik kökenli hastalıkların araştırılmasını geliştirerek, bu zara dönüştürülmüş malzeme iletken sıvıya daldırılabilir ve grafendeki küçük gözeneklerden DNA'yı çıkarmak için enerji voltajı uygulanabilir [15].

10) Bir Biyomarker Olarak Grafen

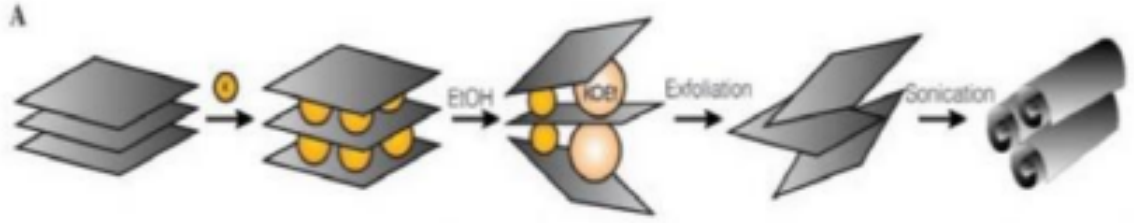
Grafen, oksijendeki kan basıncı, kan şekeri seviyeleri ve nitrik oksit için bir sensör görevi görür. Aynı zamanda, bakterileri tek tek tespit ederek bizi hasta eden patolojinin türünü belirleyen, özenle oluşturulmuş peptitlerle dış alanında bir sensör görevi görür. Büyüme hormonu gibi bazı maddelerin sonsuz küçük miktarlarını tespit etmenizi sağlayan bir immünosensördür [15].

1.2.7. Grafenin Üretim Yöntemleri

Grafen birçok farklı üretim yöntemi ile elde edilebilmektedir. Bunların öne çıkanları mikromekaniksel olarak grafitin tabakalarının ayrılması (Eksfoliasyon), Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, Grafen oksitin indirgenmesi ve Epitaksiyel büyüme olarak sıralanabilir [17].

1.2.7.1. Eksfoliasyon

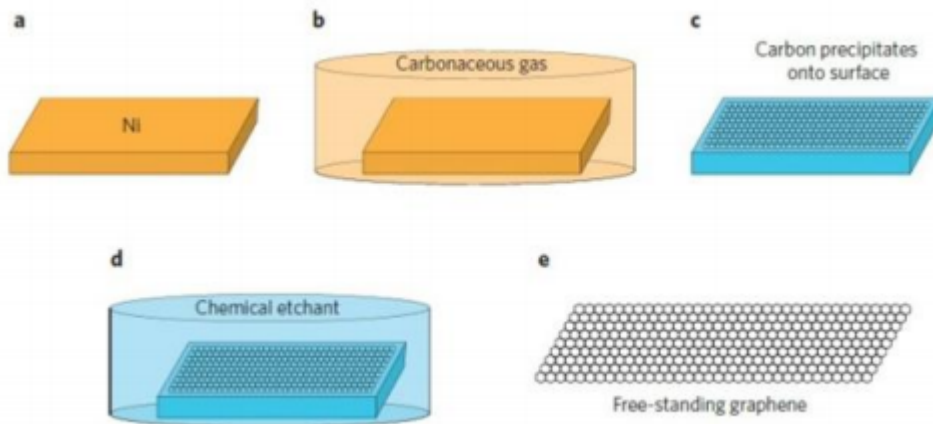
Grafit, grafen tabakalarının paketlenmiş şekilde van der Waals bağları ile birbirine bağlanmış olarak bir arada bulunduğu halidir. Bu nedenle yüksek saflıkta grafit kullanılarak aradaki zayıf bağların kırılmasıyla grafit hammaddesinden grafen elde edilebilmektedir. Bu zayıf bağların kırılması için mekanik veya kimyasal enerjiler kullanılabilir. Şekil 1.9'da eksfoliasyon yönteminin şematik olarak gösterimi bulunmaktadır [17].



Şekil 1.9. Eksfoliasyon [17]

1.2.7.2. Kimyasal Buhar Biriktirme

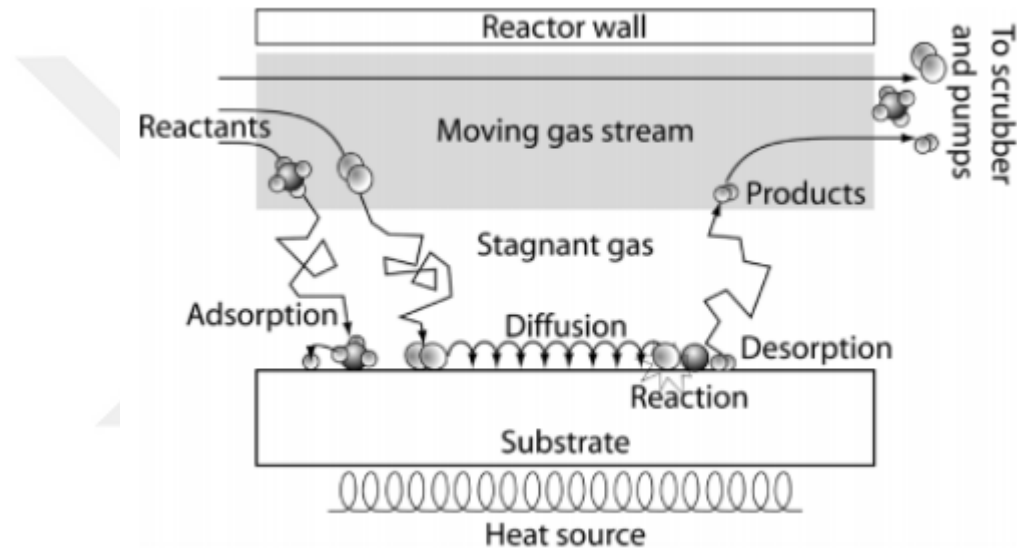
Grafen üretimi için birçok yaklaşım var olsa da ucuz, verimli, oldukça kaliteli ve tekrarlanabilir bir üretim metodu olarak kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD) en kabul görülen yöntemdir. Grafen oksit üretimi ve indirgenmesi metoduyla elde edilen grafen katmanların kusurlar içerdiği bilinmektedir. Bu yöntem aşağıdan-yukarıya üretim yöntemini kapsıyor olup kusursuz grafen katmanları üretmek için uygundur. Fakat üretim için gerekli cihaz ve ekipmanlar diğer yöntemlere göre daha maliyetlidir. Grafen tabakaları CVD tekniği ile ilk olarak nikel üzerine biriktirilmiştir. Günümüzde bu yöntemde biriktirme işlemi nikel, paladyum, iridyum ve bakır gibi geçiş metalleri üzerine gerçekleştirilmektedir. Yöntem temel olarak, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, geçiş metalleri üzerine buhar fazındaki karbon atomlarının biriktirilmesi ve ardından ayırıcı bir ajan ile yüzeyden alınması esasına dayanır. Şekil 1.10'da CVD tekniği ile yapılan grafen üretiminin aşamaları görülmektedir [17].



Şekil 1.10. CVD ile Grafen Tabakaların Üretimi [17]

Kimyasal buhar biriktirme teknikleri, buhar fazında yapılan kaplamalar içinde endüstriyel uygulama tarihi en eski tekniklerdir. CVD işlemi yaklaşık olarak 1000°C gibi yüksek işlem sıcaklığına sahiptir. Yüksek sıcaklıktan dolayı çelik matrisi ve yüzey kaplaması arasında difüzyon gerçekleşir. Bunun sonucu olarak mükemmel bir bağlanma sağlanır. Tabakanın, titanyum, karbon veya azot gibi ihtiyacı olan elementleri sağlaması açısından farklı gazlara ihtiyacı vardır.

Gaz ile temasa geçen tüm açık yüzeyler kaplanacaktır. Bu uygulama için tipik kaplamalar TiC ve yaklaşık 6-9µm tabaka kalınlığı olan sandviç (TiC – TiCN – TiN) kaplamalardır. Şekil 1.11’de CVD’nin çalışma mekanizması görülmektedir [18].

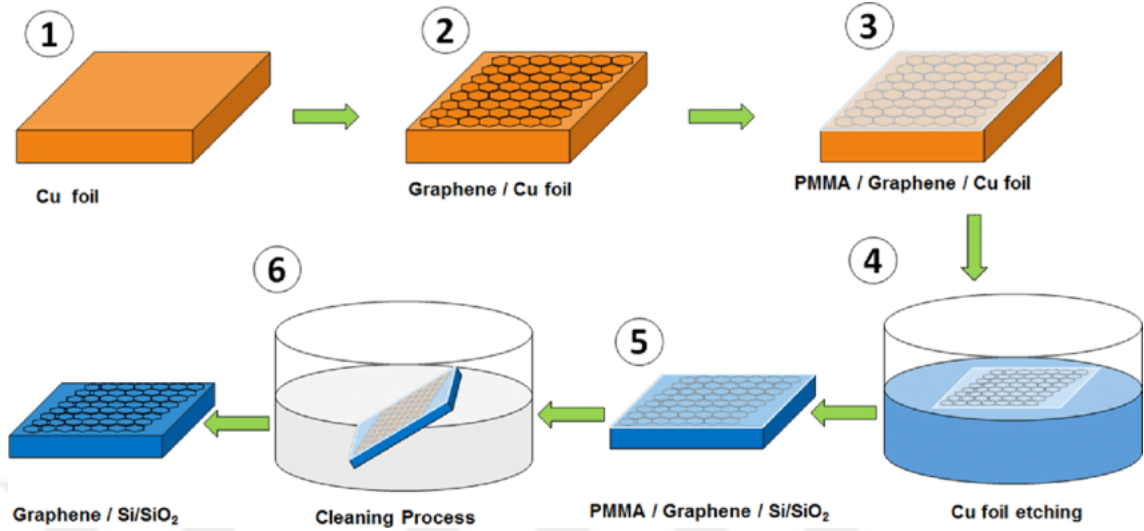


Şekil 1.11. CVD Mekanizması [18]

Bizim uygulamış olduğumuz yöntemde bakır (Cu) veya nikel (Ni) metal alttaş üzerinde grafen büyütülmüş ve elde edilen yapı istenilen yüzeye aktarılmıştır. Bu yöntemde, alttaşların yerleştirileceği kuvars altlık, CVD fırınında bulunan kuvars tüp içine yerleştirildikten sonra kuvars tüp içindeki basınç 100 mTorr değerine düşürülmüştür. Hidrokarbon (genellikle metan (CH_4)) ve hidrojen (H_2) gazlarının akışında metal alttaş üzerinde 1000°C’de grafen yapısı oluşturulmuştur.

Metal alttaş üzerinde CVD yöntemi ile biriktirdiğimiz karbon atomlarını bir araya getirerek oluşturduğumuz grafen tabakası Poly (methylmethacrylate) (PMMA) kullanılarak döndürmeli kaplama cihazında kaplandıktan sonra 0.1M $FeCl_3$ çözeltisi içine bırakılmıştır. Bakır alttaş elimizdeki bu çözelti içinde eridikten sonra grafen/PMMA yapısı istenilen yüzeye aktarılır ve PMMA’in ortamdan uzaklaştırılması için aseton ile yıkama işlemi

yapılır ve son olarak azot (N_2) gazı ile kurutulur. Şekil 1.12’de bahsedilen transfer işleminin aşamalarının şematik gösterimi bulunmaktadır [19].



Şekil 1.12. Grafen Transfer Aşamalarının Şematik Gösterimi [19]

i. CVD Kaplama Yönteminin Avantajları

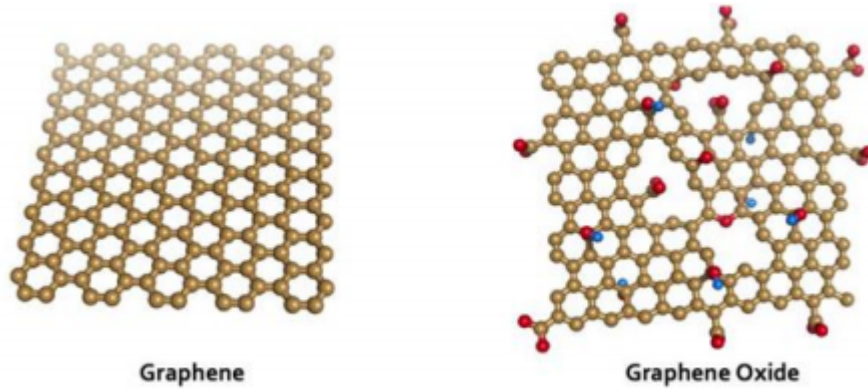
CVD'nin fiziksel buhar birikme yöntemine göre bir takım avantajları vardır. Örneğin, reaksiyon çoğu zaman daha kolay seçilecek şekilde düzenlenebilir. CVD genellikle fiziksel buhar birikiminden daha uyumludur, yani fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinde olduğu gibi alt tabakanın dikey duvarlarında ince, düşük kaliteli kaplamalara neden olmak yerine morfolojiyi izleyerek pürüzlü bir yüzeyi nispeten eşit bir şekilde kaplar. Diğer avantajlar arasında, CVD'nin, büyüme ortamının kontaminasyonu olmadan yeniden doldurulabilen dış rezervuarlardan işlem odasına akan kaynak malzemeler kullanması, çok yüksek vakum seviyeleri gerektirmemesi, genellikle alt tabakaları buharlaşmadan daha büyük partiler halinde işleyebilmesidir. Bu avantajları dengeleyen CVD kaynak malzemeleri genellikle yüksek derecede toksik veya yanıcıdır ve CVD proses sisteminin tasarımında ve işletiminde büyük özen gerektirir. CVD ayrıca sıklıkla yüksek sıcaklıklar gerektirir ve en büyük dezavantajı yüksek sıcaklıktır. Kaplama sonrası yavaş soğutmadan ötürü tavlanmış olan takımın CVD işleminden sonra tekrar sertleştirilmesi gerekir. Bu sertleştirme sonrası, son işlemesi yapılmış takımın çarpılma ve boyutsal değişime sebep olabilir [18].

ii. CVD Uygulama Alanları

Optik fiberler ve telekomünikasyon, nano makineler, yarı iletkenler ve ilgili cihazlar, bütünleşmiş devreler, algılayıcılar, kompozitler, elyaf ve toz üretiminde, elektronik sanayisinde, makine imalat sektöründe kesici – delici – aşındırıcı yüzey üretiminde, havacılık üzerine birçok alanlarda uygulanmakta ve önem kazanmaktadır [18].

1.2.7.3. Grafen Oksitin İndirgenmesi

Grafen oksit, grafit tabakalarının oksitlenerek birbirinden ayrılmış tek katmanlı haline verilen isimdir. Grafen oksit C:O oranı 3' den düşük ve tipik olarak 2' ye yakın olacak şekilde fonksiyonel gruplar içerir. Grafenin yüksek miktarlarda üretimi için ön planda olan yöntemlerden biri grafitten kimyasal proseslerle üretilen grafen oksitin çeşitli yollar kullanılarak indirgenmesidir. Bu yöntemin iki temel avantajı ön plana çıkmaktadır, bunlar ucuz grafit hammaddesi kullanılarak verimli üretimin sağlanması ve üretilen grafitin hidrofilik olması nedeniyle stabil çözeltiler hazırlanabilmesi olarak özetlenebilir. Grafen ve grafen oksite ait temsili görüntüler Şekil 1.13'de verilmiştir [17].

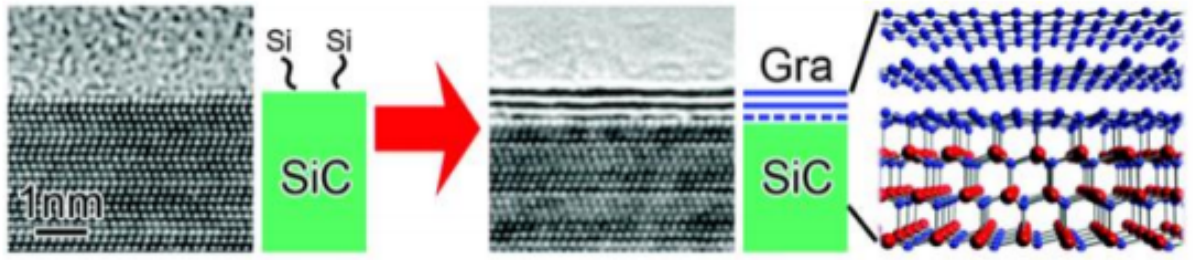


Şekil 1.13. Grafen Oksit [17]

1.2.7.4. Epitaksiyel Büyütme

Grafenin Silisyum Karbür (SiC) üzerine büyütülmesi Epitaksiyel büyüme olarak anlandırılır. Bu yöntemde büyüme şartlarına bağlı olarak SiC tabakası 1150 ile 2000

derece arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Bu ısıtma sonucu silisyum desorpsiyonu meydana gelir ve geride kalan karbonlar epitaksiyel olarak bir araya gelerek grafeni oluştururlar. Karbon kaynağı SiC tabakası olduğundan dolayı yeni katmanlar oluşan ilk katmanın altında oluşur ve çok katmanlı grafenler elde edilir. Üretilen grafenin katman sayısı SiC tabakasının kalınlığına bağlıdır. Şekil 1.14'de [17] bahsedilen bu yöntemin gösterimi bulunmaktadır. Bu sistemde olası problem, sistemin kendinden sınırlı olmasıdır. İlk grafen katmanları oluştuğundan sonra desorbe olan Si kaçış yolu bulamaz bu yüzden tabakadan uzaklaşamayabilir. Bu da büyümenin sonu anlamına gelmektedir.



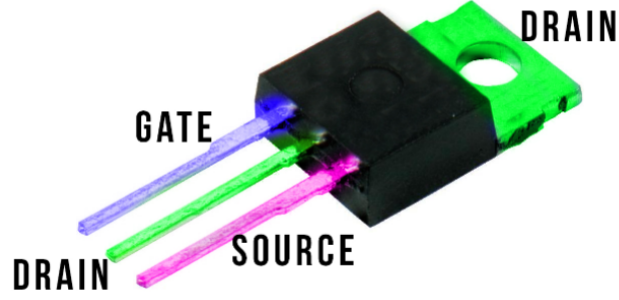
Şekil 1.14. Epitaksiyel Büyütme [17]

1.3. Alan Efekti Transistörleri (FET)

Bir alan etkisi transistörünü (FET), akım akışını modüle etmek için yakındaki bir elektrik alanını ve bununla ilişkili voltaj farkını kullanan elektriksel bir bileşen olarak tanımlanabilir. FET'ler genellikle üç terminalli veya elektrotlu cihazlardır: yarı iletken bir kanal bu elektrotların ikisi arasında çalışır-kaynak ve drenaj- kapı olarak adlandırılan üçte biri kontrol görevi görür. Kapıya uygulanan voltaj farkı, yön ve kuvvetine bağlı olarak yarı iletken kanal boyunca yük taşınmasına izin verir veya engeller [20]. Aşağıda görülen Şekil 1.15 alan efekti transistörlerinin yapısını göstermektedir [21].

1.3.1. GFET Konfigürasyonu

Grafen Tabanlı Alan Efketi Transistörlerinde kullanılan üç tipik konfigürasyon- (i) arka kapı, (ii) çift kapı, (iii) üst kapıdır. Arka kapı konfigürasyonu, üzerine bir dielektrik depolandığı yüksek katkılı silikon substrattan ve ardından bir kanal olarak hareket eden bir



Şekil 1.15. FET Yapısı [21]

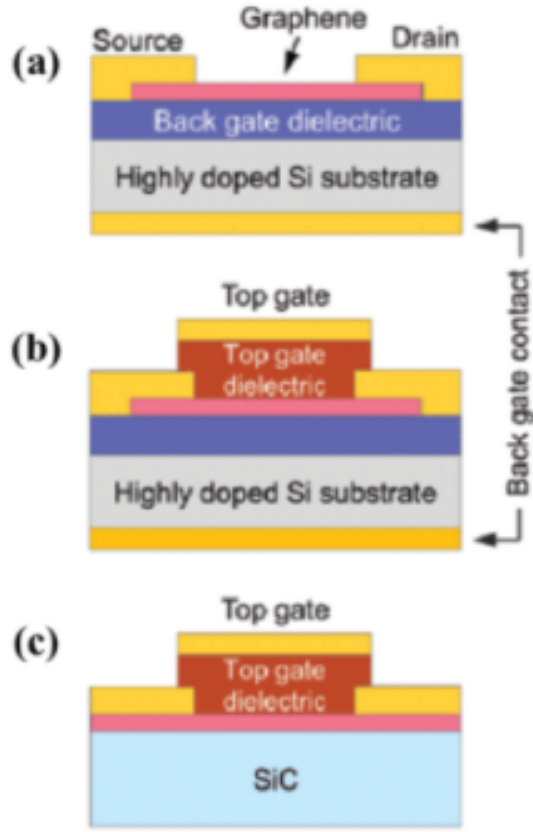
grafen pulunun biriktirilmesiyle oluşur. Kaynak ve tahliye temaslarını oluşturmak amacıyla pul iki ucuna temas ettirilir. İkili geçit konfigürasyonu, başka bir geçit oluşturmak için pulun üzerine biriktirilen bir dielektrikten oluşmaktadır ve böylece her iki geçidin kanaldaki serbest taşıyıcı konsantrasyonunu kontrol etmesine izin verilir. Üst geçit Grafen FET, bir SiC tabakasının üstünde epitaksiyel grafen yetiştirilerek imal edilebilmektedir. Grafen tabakasının üstünde, üst geçidi oluşturmak için bir dielektrik tabaka biriktirilir (genellikle alüminyum oksit). Şekil 1.16'da grafenin çeşitli konfigürasyonlarına ait şekiller bulunmaktadır [22].

1.3.1.1. Arka Kapılı GFET'ler

Genellikle, SiO_2 tabakası (300nm), substrat olarak seçilir ve grafen ilmik, substrat yüzeyinde mekanik eksfoliyasyon veya CVD metodu ile büyütülür. Elektrot desenleri, litografi ve elektron ışını dağlamasıyla fotorezist yüzeyine aktarılır ve sonra metal elektrotlar tamamen elektron ışını buharlaşma ve hava alma işleminden sonra imal edilir [23].

1.3.1.2. Üst Kapılı GFET'ler

Kapı dielektrik olarak bir yalıtkan (silisyum dioksit, alüminyum oksit veya PMMA gibi) arka kısım yerine grafen yüzeyinde hazırlanırken, üst kapı grafen cihazı metal elektrotun kapı dielektrik yüzeyinde immobilizasyonundan sonra imal edilmektedir. Arka kapılı GFET'lere kıyasla, üst kapılı GFET'ler devre uygulamasında daha fazla esneklik



Şekil 1.16. (a) Arka Kapılı Grafen Transistör; (b) Çift Kapılı Grafen Transistör; (c) SiC ve Transistör Yapısından Epitaksiyel Grafen Oluşumu [22]

göstermektedir. Bununla birlikte, üst kapılı cihazda mobilite, arka kapılı yapıda olduğundan daha düşüktür. Bunun sebebi, üst kapı dielektrikinin daha fazla saçılma kaynağına sebep olmasıdır. Ayrıca, fabrikasyon işlemi sırasında grafen kolayca imha edilebilir. Bu nedenle, yüksek taşıyıcı hareketliliğini grafen içinde tutmak, üst kapılı GFET'leri iyi performansla üretmek için çok önemlidir [23].

1.3.1.3. Arka ve Üst-İki Kapılı GFET'ler

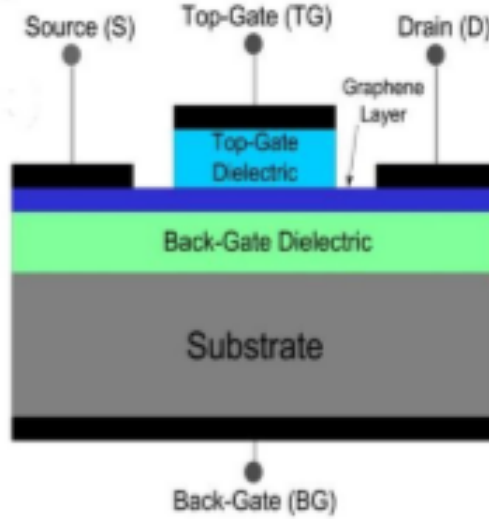
Arka ve üst çift kapılı GFET'leri daha iyi anlamak için, nispeten kısa bir üst kapıya ekleyen bir arka kapı modeli sunulmuştur. Bu model, akım-gerilim özelliklerini incelemek için kullanılabilir. Grafen bazlı FET, arka kapı olarak görev yapan iletken bir substrat ve üst kapı olarak bir metal üzerine bir grafen katmanla imal edilir. Grafen burada kaynak ve drenaj elektrotları arasında iletken malzeme olarak hizmet eder [23].

1.3.2. Grafen FET Çeşitleri

Grafen FET'ler tek katmanlı ve çift katmanlı olarak ikiye ayrılır.

1.3.2.1. Tek Katmanlı GFET'ler

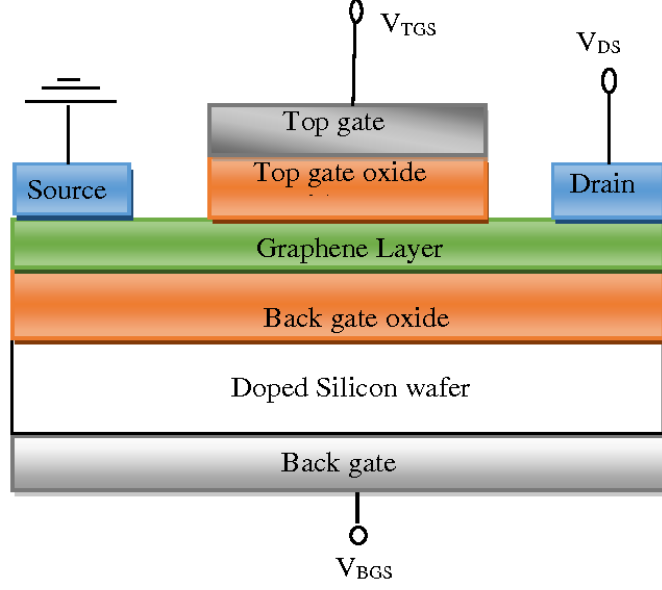
Tek katmanlı GFET'e karşılık gelen cihaz Şekil 1.17'de gösterilmiştir. Grafen filmi üst ve arka kapı dielektriklerinin arasına yerleştirilmiştir. Kaynak ve drenaj ohmik kontaklarının yanı sıra üst kapak yığını da grafen kanalının üstünde bulunur. Arka kapı yığını bir dielektrikten ve arka kapı olarak görev yapan bir alt tabakadan oluşur. Bu yapıda, erişim bölgesi dirençleri, uygulanan arka kapı yanlılığının bir fonksiyonu olarak modellenmiştir [24].



Şekil 1.17. Tek Katmanlı GFET Yapısı [24]

1.3.2.2. İki Katmanlı GFET'ler

İki katmanlı GFET'e karşılık gelen cihaz Şekil 1.18'de gösterilmiştir. İki tabakalı grafen kanalının tepesinde, üst kapı yığınının yanı sıra kaynak ve boşaltma ohmik temaslarının bulunduğu varsayılmaktadır. Arka kapı yığını bir dielektrikten ve arka kapı olarak görev yapan bir alt tabakadan oluşur [24].



Şekil 1.18. İki Katmanlı GFET Yapısı [24]

Çift katmanlı grafen, grafitten [25] pul pul dökülme veya kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile yapılabilir. Tek katmanlı grafen gibi, çift katmanlı grafen sıfır bant aralığına sahiptir ve bu nedenle yarı metal gibi davranır. Çift katmanlı grafen, alan etkili transistörler [26] [27] veya tünel alan etkili transistörler [28] oluşturmak için küçük enerji boşluğundan yararlanarak kullanılabilir. Bununla birlikte, enerji aralığı 250 meV'den küçüktür ve bu nedenle, bir alan etkili transistör için makul bir performans elde etmek için çok küçük olan düşük çalışma voltajının (< 250 mV) kullanılmasını gerektirir.

İki tabakalı grafenin avantajı yerel olarak kısıtlanmış bir alan yaratma ve değerini yönetme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu benzersiz özellik, mikroelektronik ve optik alanlarında kullanımı mümkün kılmaktadır (yeni nesil transistörlerin üretimi, vb.). İki tabakalı grafenin diğer bir benzersiz özelliği ise baskı altında inanılmaz derecede zorlaşması ve dayanıklılığıdır. Elmas gibi, esnek vücut zırhlarında kullanılmasını mümkün kılar [29].

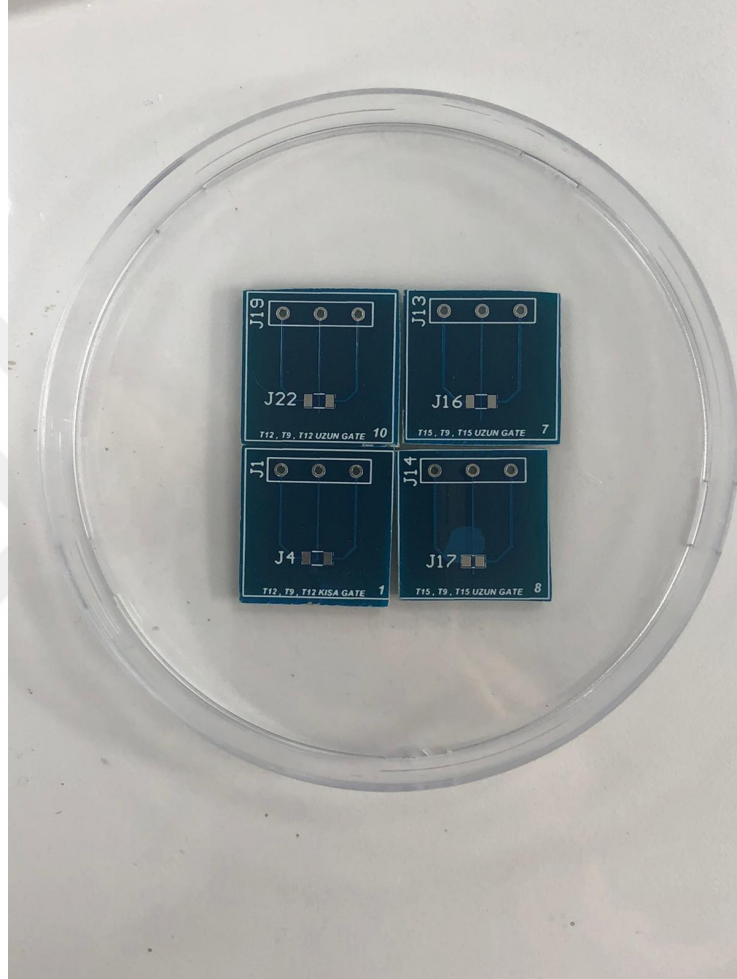
2. TASARIM VE ÜRETİM PLANLAMA

Bu çalışmada gelecek senelerde yapılacak olan sensör tabanlı çalışmalara temel oluşturabilmesi için ucuz bir yöntem olan baskı devre kartı üzerine yaptığımız GFET tasarımında grafen kanalın üstte kalacağı ve üretim aşamalarının oldukça kısa olacağı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Kullan-at sensör tasarımı elde edilmiştir. Grafenin üst durumda olduğu bu tasarımın farklı alanlarda kullanımı da mümkündür. Kart tasarımı yapılırken üzerine grafen konacağı ve bacaklar üzerinden ölçüm alınacağı dikkate alınarak çizimler oluşturulmuştur. Baskı devre kartı tasarımında bulunan gate bacakları üzerine iletkenliğini artırması açısından gümüş ve küçük bir miktarda altın buharlaştırarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Altın kaplama aşamasından sonra kart üzerine grafeninde yüksek iletkenlik özelliğine sahip olması açısından gümüş ve altın kaplama ile olan uyumluluğu ölçümlerle incelenmiştir.

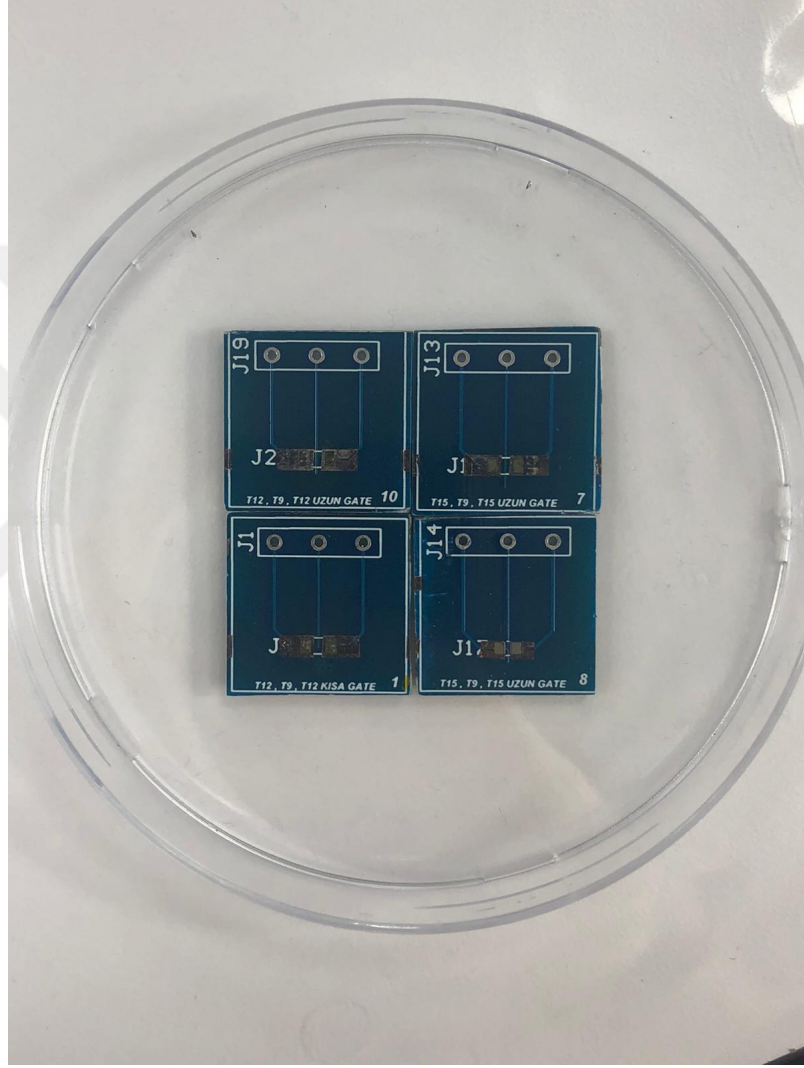
2.1. Grafen FET Tasarımı

FET daha önce de bahsedildiği üzere source, gate ve drain olmak üzere üç elektrodu olan ve drain-source bacakları arasında kanalı bulunan bir elektronik elemandır. Burada önemli olan nokta gate elektrodunun yalıtımının sağlanması gerektiğidir. Grafen FET'deki tek ve en büyük fark kanalda iletkenliğin sağlanması amacıyla elektrik iletkenliği yüksek olan grafenin kullanılmasıdır. Bu tez çalışmasında tasarlanmış olan GFET gate elektrodu üst tabakada yer almaktadır ve bu sebeple özgün bir tasarım oluşturulmuştur. Baskı devre kartı kullanılmış olmasından ötürü kanalın üstte olması gerekmektedir. Metal elektrotların üretim optimizasyonları yapılırken grafenin zarar görmemesi çok önemli bir noktadır. Bu elektrotların seçimi yapılırken grafen ile metalin kontakta oluşacak yüksek direnç FET'i etkileyeceğinden gate elektrodu olarak alüminyum seçilmiştir. Alüminyumun seçilme nedeni ise kendi kendine yalıtkan malzeme oluşturabilme özelliğine sahip olmasıdır. Aşağıda görülmekte olan Şekil 2.1'de, tasarlanmış olan GFET yapısı bulunmaktadır.

Gate bacaklarının kalınlıklarının kısa devre yaşanmamasına dikkat edilecek şekilde minimum tutulmasına özen gösterilmiştir. Bu aşamalardan sonra tasarımda bulunan metal bacaklar (drain-source) üzerine önce gümüş (2um kalınlığında) ardından da altın (100nm kalınlığında) kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Gate bacağıımız yalıtkan olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.2. Basımı Yapılmış Baskı Devre Kartı



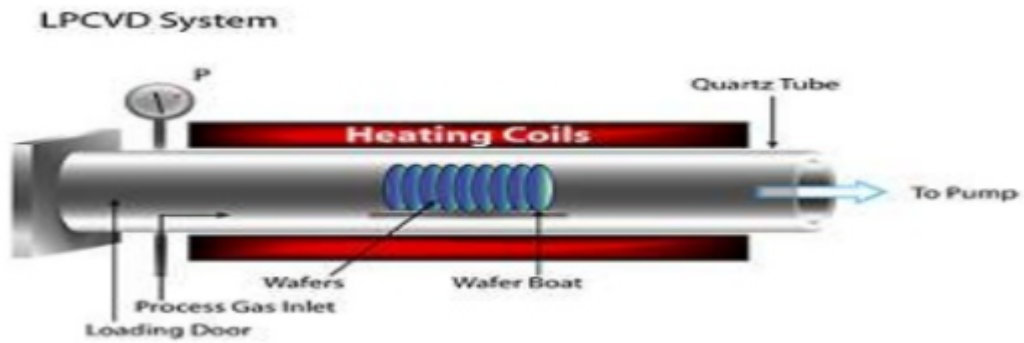
Şekil 2.3. Baskı Devre Kartı Üzerindeki Metal Bacakların Gümüş ve Altın Kaplanmış Hali

3. ÜRETİM AŞAMALARI VE UYGULAMALAR

Grafen üretim aşaması iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk kısımda grafenin metal alttaş üzerine büyütülme işlemi yapılmış, ikinci kısımda ise grafenlerin baskı devre kartı üzerine transferi ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

3.1. Tek Tabakalı Grafenin Üretim Aşamaları

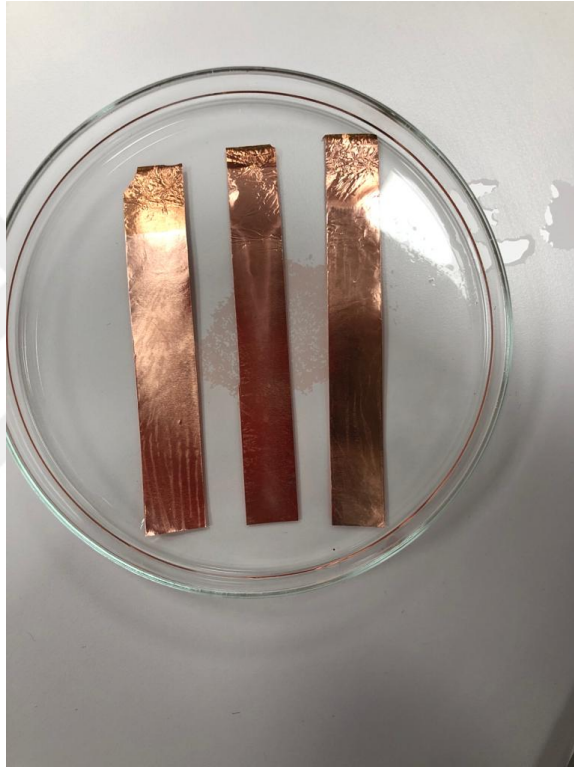
Tek tabakalı grafen büyütme en çok tercih edilen ve en kaliteli üretim yöntemi kimyasal buhar biriktirme (CVD) sisteminde gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilen bu sistemde [30] H_2 , CH_4 ve Ar gazları istenilen oranlarda bir kütle akış kontrolcüsünden (MFC) geçerek iki ucu yalıtılmış kuvars tüp içine girer. Kuvars tüp yüksek sıcaklığa sahip fırının içinden geçer. Gaz geçişi esnasında kuvars tüpü istenilen sıcaklığa getirir. Vakum pompası ise hem ortamdaki oksijeni arındırmak hem de kuvars tüp içerisine dolan gazları sistemden alıp uzaklaştırmaya yarar. Bu yöntem ile Cu ve Ni alttaşlar üzerinde tek yada çok tabaka grafen yapıları oluşturulabilmektedir. Kaplama kalınlıkları $10\mu m$ den daha küçüktür. Kaplama sıcaklığı ise genellikle $500-1100^\circ C$ arasındadır. İşlem süresi yapılan tabaka kalınlığına bağlı olarak 2-4 saat arasında değişmektedir.



Şekil 3.1. Kimyasal Buhar Biriktirme ile Grafen Üretim Şekilsel Gösterimi [30]

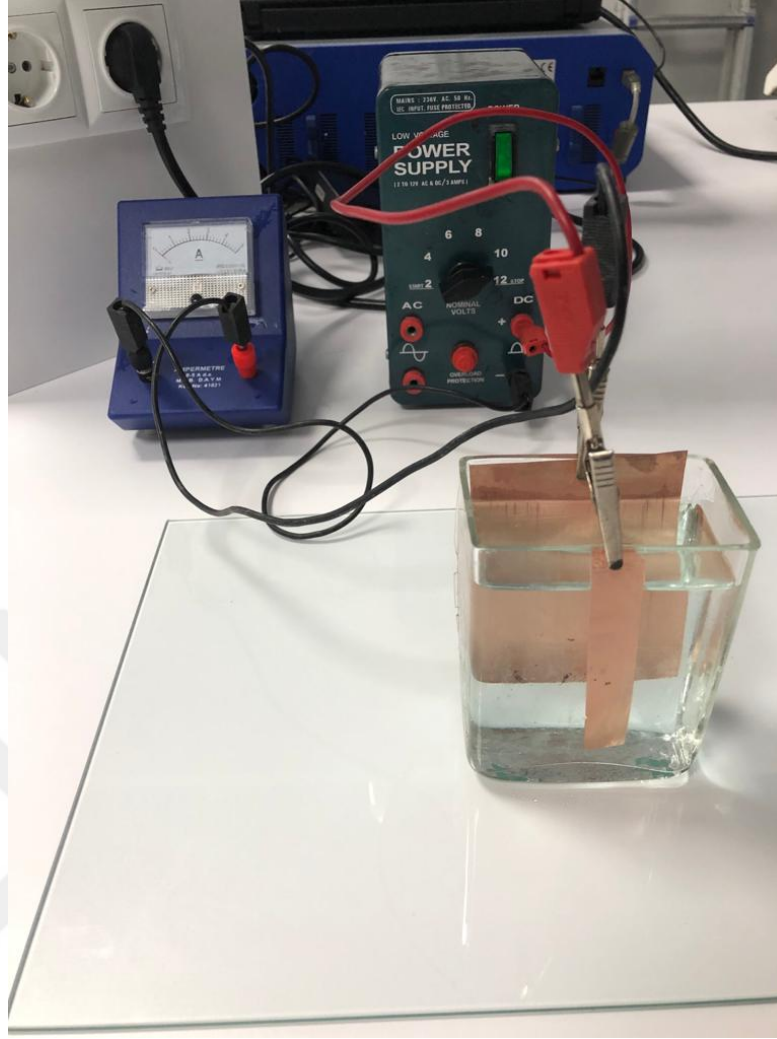
3.1.1. Metal Alttaşın Hazırlanması

Grafen üretiminde kullandığımız metal alttaş, 1'er cm² ile kesilen 25µm (Alfa Aesar Part# 46986) kalınlığında bakır folyolardır. Standart temizlik işlemimizde bakır alttaş bir cam petri kabında önce aseton içerisinde 10 dakika bekletilir. Daha sonra isopropil alkol (IPA) içerisinde 10 dakika süreyle bekletilir ve arkasından N₂ (nitrojen) gazı ile kurutulma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3.2'de bakırların (IPA) isopropil alkol içerisindeki hali gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bakırların Elektrolize Hazırlanması

Nitrojen gazı yardımıyla kurutulan bakır folyolar, elektroliz ile parlatma işleminde asidik elektroliz çözeltisinde karşıt elektrot olarak bağlanmaktadır ve karşısına daha kalın ve daha büyük yüzey alanlı başka bir bakır plaka konulmaktadır. Şekil 3.3'de gösterilen düzenekte, bir güç kaynağına bağlanarak bakır alttaşın 90 saniye boyunca bakır ile kaplandığı hali görülmektedir.



Şekil 3.3. Bakır Alttaşın Eletrolizi

Bakır ile kaplanan alttaş önce deiyonize (DI) su ile yıkanmaktadır. Bu yıkama işleminin ardından aseton ve 2-propanol (IPA) ile beşer dakika boyunca yıkanır. Daha sonra N_2 gazı ile kurutulan alttaş istenilen boyutlarda kesilerek kuvars zemin üzerine konularak CVD fırın içine yerleştirilir. Şekil 3.4’de kuvarz zemin üzerine yerleştirilmiş olan bakırları görmekteyiz.



Şekil 3.4. Bakırların Kuvarz Zemine Yerleştirilmesi

3.1.2. Tek Tabakalı Grafen Üretimi

Yüksek kaliteli grafen üretimi, Şekil 3.5’de gösterilen MTI marka OTF-1200X model bir CVD cihazı ile yapılmıştır. Bakır alttaşların yerleştirileceği kuvars altlık, CVD fırınında bulunan kuvars tüp içine yerleştirilmeden önce aseton ve IPA ile temizlenir ve nitrojen gazı yardımıyla kurutulur. CVD fırının içindeki kuvars tüp IPA ile temizlenir. Metal alttaş kuvars tüpün orta kısmına yerleştirildikten sonra kuvars tüp yalıtılır ve içindeki basınç yaklaşık 5 dakika içerisinde 100 mTorr değerine düşürülür. Bu işlem ortamdaki oksijenden arınmamızı sağlar. Daha sonra 100 sccm Argon (Ar) ve 50 sccm Hidrojen (H_2) gazlarının akışı başlatılır ve basıncın 20 Torr’da sabitlenmesi sağlanır.

CVD fırını 70-75 dakika içinde ortalama $1030^{\circ}C$ ’ye çıkarılır ve metal alttaş 25 dakika süreyle $1030^{\circ}C$ ’de bekletilir. Daha sonra proses sıcaklığı olan $1000^{\circ}C$ ’ye düşürülerek grafen sentezi işlemine geçilmiş olur. Grafen büyütme aşamasında Argon (Ar)

gazı kapatılır ve Hidrojen (H_2) gazı 400sccm'e çıkarılır. Birkaç dakika basıncın sabitlenmesi için beklemeden sonra grafeni oluşturacak hidrokarbon gaz olan Metan (CH_4) gazı 200sccm oranında açılarak 5 dakika süreyle gaz geçişi sağlanır. Bu sürenin sonunda Metan (CH_4) gazı kapatılarak Hidrojen (H_2) gazının akış oranı 50sccm'e düşürülür. Son aşamada ise Argon (Ar) gazı açılarak 100sccm oranında akış sağlanır ve sistem oda sıcaklığına kadar soğutulur. Soğumanın en az 45-50 dakika olması sağlanır. Fırının sıcaklığı $100^{\circ}C$ 'nin altına düştükten sonra kapatma işlemleri gerçekleştirilir.



Şekil 3.5. MTI-OTF 1200 Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Cihazı

3.1.3. Baskı Devre Kartındaki Metal Bacakların Termal Buharlaştırma Cihazında Kaplanması

Bu sistem tek bir alttaş üzerine saçırma ve termal buharlaştırma tekniklerini kullanmaktadır. Maksimum dört farklı malzeme biriktirmek için kullanılabilir. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılacak kaplamalar elektronik aygıt üretimi, fotovoltaik uygulamalar gibi birçok alanda tercih edilen yöntemlerdendir.



Şekil 3.6. Termal Buharlaştırma Cihazı

İnce film kaplamalarda kalınlık 1-10 μ m arasında değişir. Kaplamanın birikmesi ise atomik ölçekte gerçekteşmektedir. Sistem Ge, Ni, Au, Ag, Al, Cr, Ti ve benzer metalleri buharlaştırabilme kabiliyetine sahiptir.

Sistemde iki adet termal buharlaştırma kaynağı bulunur. Kaynaklar 200A kadar akım taşıyabilmektedir. Sistemde iki kaynaklı rezistif termal buharlaştırma yanında bir adet DC ve bir adet RF magnetron sıçratma kaynağı bulunur. Sıçratma yapılacak metallere; metal, metal oksit, metal nitrit, dielektrik malzemelerdir. Sistemde kuartz kristal kaplama sensörü bulunmaktadır. 0.5nm hassasiyette okumalar yapılabilmektedir [31].

Şekil 3.6'da görülen vaksis termal buharlaştırma ünitesinde $1 * 10^{-6}$ Torr basınçta 2 μ m kalınlığında gümüş ve 100nm kalınlığında altın buharlaştırma işlemi gerçekteştirilmiştir. Metal yüzeylerimiz olan source (S) ve drain (D) bacakları üzerinde kaplama yapılmıştır. Peşpeşe yapılan bu işlemlerde altın kullanılmasının nedeni soy metal olması, oksitlenmemesi ve iř fonksiyonunun büyük olmasıdır. Şekil 3.7'de ise termal buharlaştırma cihazının proses esnasındaki görüntüsü bulunmaktadır.



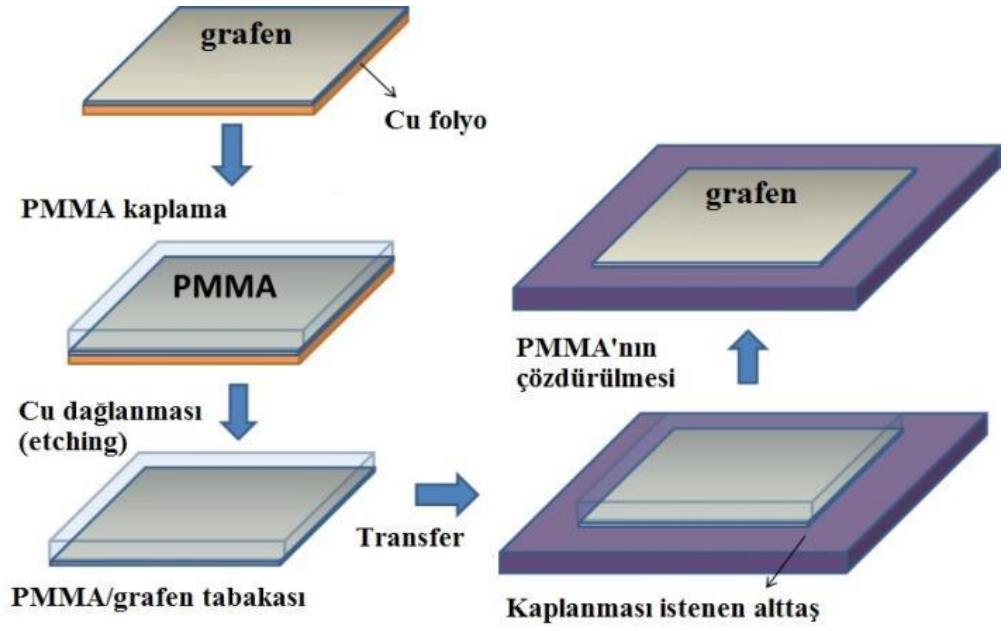
Şekil 3.7. Proses Halinde İken Termal Cihaz İçerisindeki Görünüm

3.1.4. Üretilen Grafenin Transferi

Metal altlık olarak kullandığımız bakırın üzerinde büyütmüş olduğumuz tek tabakalı grafenin istenilen yüzeye başarılı bir şekilde transfer edilmesi oldukça önemlidir. Grafen transferi oldukça ciddi aşamalardan biridir çünkü burada grafene zarar vermeden farklı bir yüzeye transferini sağlamak çok önemlidir.

Genellikle literatür taramalarında aktarım işleminde grafen destek malzemesi olarak Poly methyl methacrylate (PMMA) polimerinden bahsedilir ancak bizim çalışmamızda hem ışık altında hem de düşük sıcaklıkta kolay ve hızlı bir şekilde katılaşabilen, damlatma ve kaplama tekniğine uygun olan fotorezist adlı malzeme kullanılmıştır. Bahsetmiş olduğumuz bu fotorezist polimeri kalın bir film oluşturacak şekilde grafen kaplı yüzeylere damlatılır ve oluşan bu fotorezist/grafen/bakır yapısını yaklaşık 18 saat etüv cihazda 70°C’de bekletilir. Bu süre sonunda kuruyan fotorezist kaplı grafenleri etüvden çıkartılır. Bakır folyoların çözülmesini gerçekleştirmek için 0.1M amonyum peroksidisülfat çözeltisinde 12 saat kadar bekletilir. 12 saatin sonunda fotorezist kaplı olan grafen yapısı çözelti yüzeyinde asılı halde kalmış olur.

Hot plate olarak adlandırdığımız cihaz üzerinde bulunan baskı devre kartı yüzeyine fotorezist/grafen yapısı bırakılır ve kart yüzeyine yapışması sağlanır. Daha sonra aseton içerisine atılarak hafif sallama hareketleriyle fotorezist aşındırılır ve baskı devre kartının yüzeyinde grafen yapısı elde edilir. Grafen/baskı devre kartı yapıları aseton içinden çıkarıldıktan sonra IPA dolu bir kap içinde bekletilerek çözelti artıklarından arındırılır. Nitrojen gazı ile kuruttuğumuz grafenlerimizin kalitesini gözlemlemek amacı ile Raman spektroskopisi kullanılmaktadır. Şekil 3.8’de grafen transfer şeması verilmiştir [32].

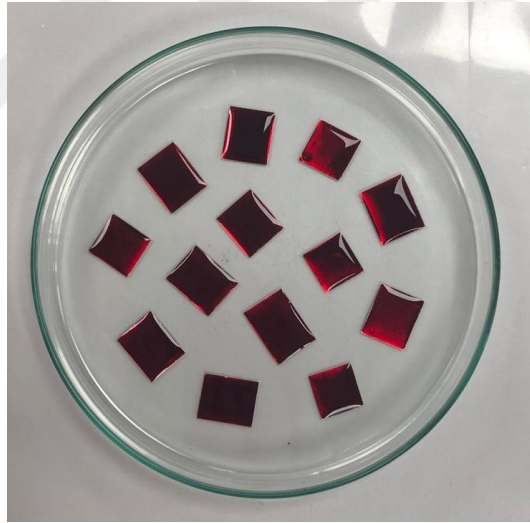


Şekil 3.8. Grafen Transfer Şeması [32]

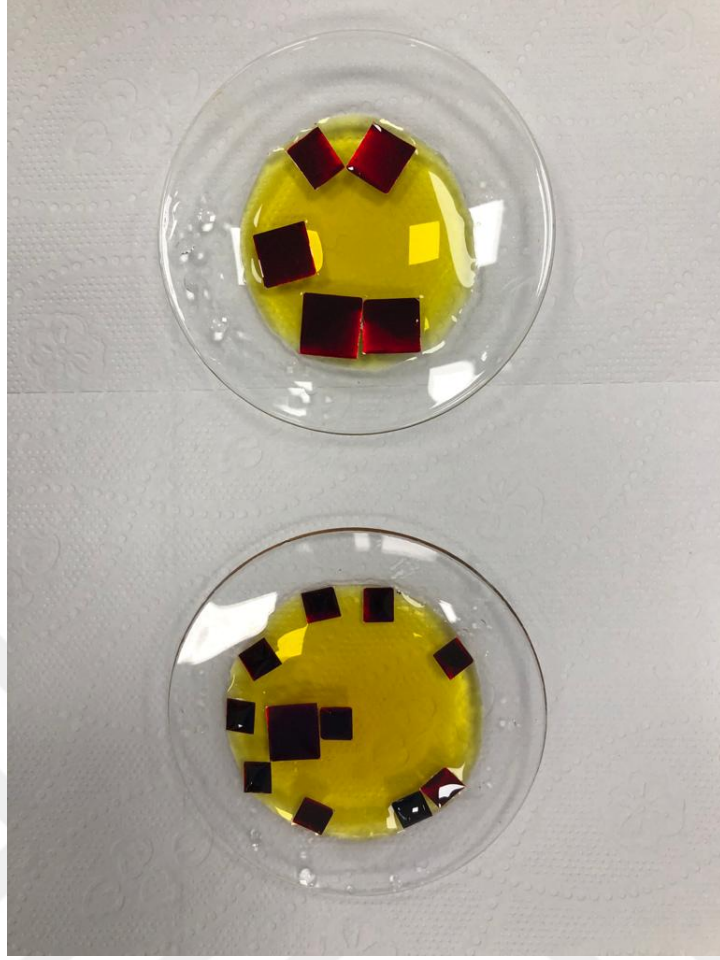
Grafenlerin fotorezist kaplanmadan önceki hali Şekil 3.9’da ve fotorezist kaplanmış hali de Şekil 3.10’da görülmektedir. İşlemler cam petri kapları içinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11’de ise bahsedilen amonyum peroksidisülfat çözeltisi içerisindeki grafenler bulunmaktadır.



Şekil 3.9. Fotorezist Kaplama Yapılmadan Önce Grafenler

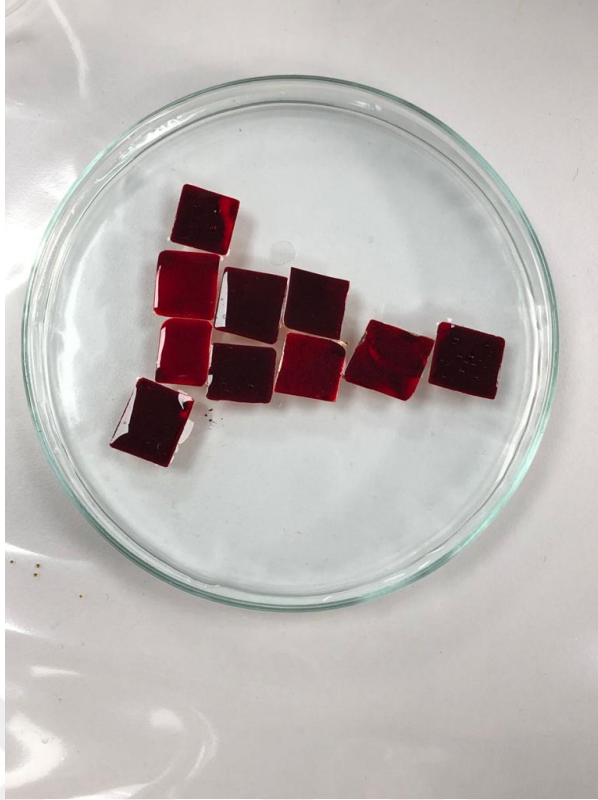


Şekil 3.10. Fotorezist Kaplı Grafenler



Şekil 3.11. Fotorezist Kaplı Grafenlerin Fotorezist Tabakasının Çözdürülmesi

Bir adet saat camı üzerine biraz demir(III) klorür ($FeCl_3$) çözeltisi konur. İçine ısınmış grafenler atılır. 5-10 dk bu çözelti içinde bekletilir. Daha sonra mikropipet ile içindeki çözeltinin bir kısmı çekilerek atık kabına boşaltılır. Mikropipet ile saf su çekilerek saat camı içerisine eklenir. Tekrar çözeltiden biraz alınıp atık kabına boşaltılır ve saf su çekilerek saat camına konular. Cam içerisindeki çözelti tamamen bembeyaz olana kadar aynı işleme devam edilir. Daha sonra saat camı içerisindeki saf su tamamen çekilip atık kabına boşaltılır. Sonraki aşamada ise grafenler saat camı içerisinden alınıp amonyum persülfat çözeltisi içerisinde yansıması görülene kadar birkaç saat yüzdürülür.

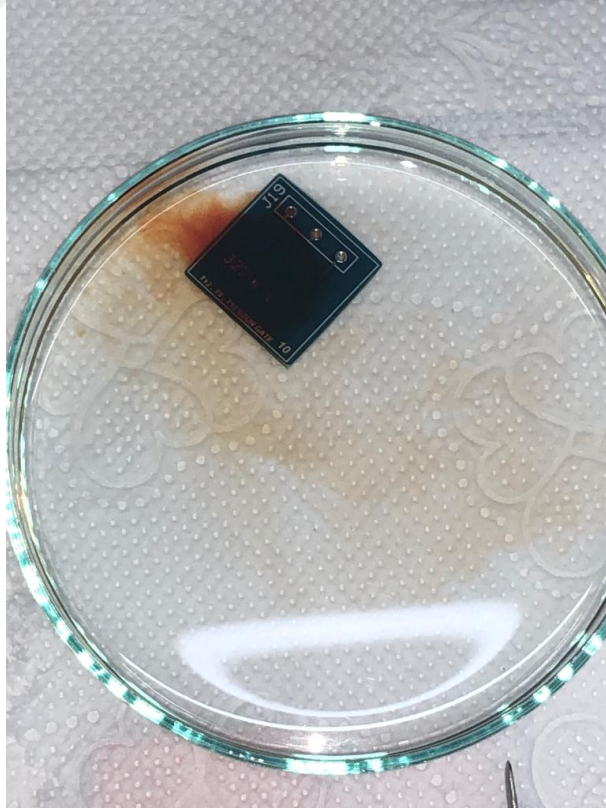


Şekil 3.12. Fotorezist Kaplı Grafenlerin Amonyum Peroksidisülfat Çözeltisinde Beklemesi

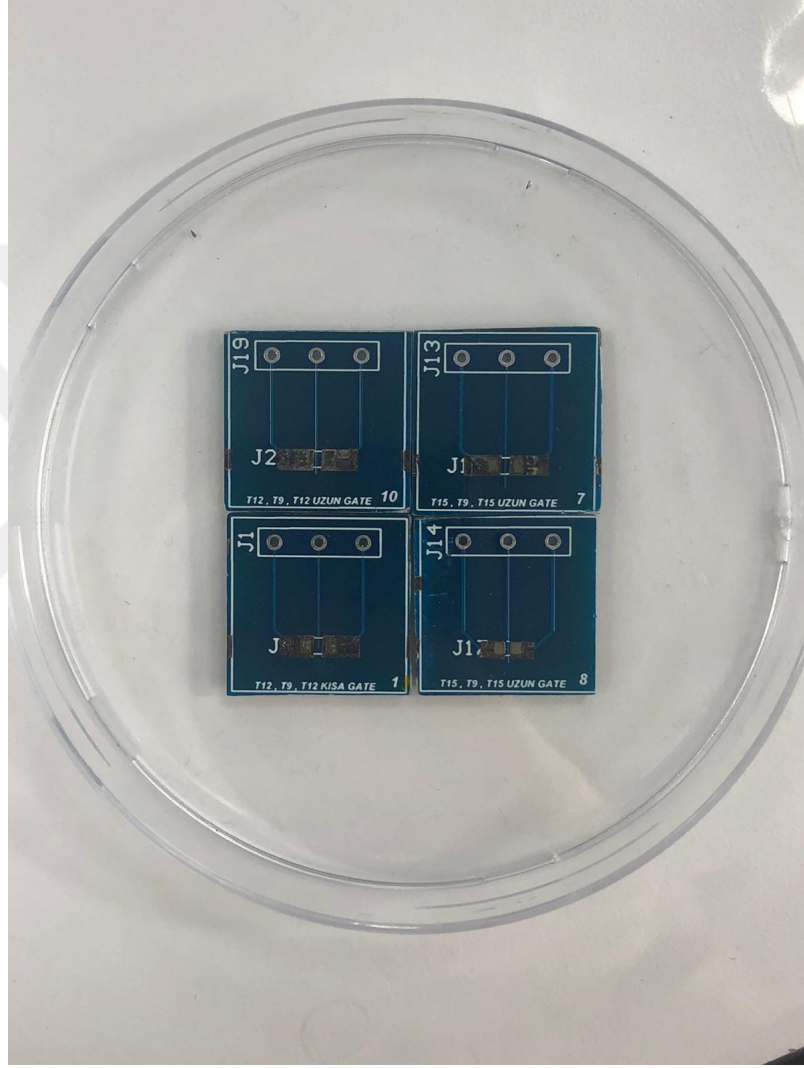
Transfer aşamasına gelindiğinde, Şekil 3.12’de görülen cam petri kabının içinde amonyum persülfat çözeltisi içerisinde birkaç saat yüzdürülmüş olan grafenler saat camı ile çözelti içerisinde alınır. Üzerine saf su ilave edilir. İçindeki karışım saf su ilave edildikçe çözelti seyreltilir. Daha sonra saat camı içerisindeki grafenler bir kağıt yardımıyla alınıp kuru peçetenin üzerine koyulur. Burada önemli olan noktalardan birisi üst tabakaya değmemeye özen göstermektir. Çok hafif ayarında açılmış azot pompası ile grafenler kurutulur. Elektronik kartların üzeri IPA ile temizlenip azot ile kurutulduktan sonra transfer edilmesi istenilen yerin üzerine grafen konulur. Şekil 3.13’de 90 derecede ısıtılacak olan kartların hot plate üzerine bırakılması görülmektedir. Grafen kart yüzeyinin üzerine tamamen yapıştıktan sonra kuru peçete üzerine alınarak birkaç dakika soğumaya bırakılır. Daha sonra fotorezistten kurtulmak için Şekil 3.14’de görüldüğü gibi aseton dolu bir petri kabına atılır. Fotorezist tamamen kaybolana kadar beklenilir. Tekrar başka bir aseton dolu petri kabına alınır atılır ve 5-10 saniye beklendikten sonra kabın içerisinde alınır ve azot pompası ile kurutulur. Bu işlem sonucundan 1nm’den daha az kalınlıkta bir grafen elde edilmiş olur. Şekil 3.15’de görülen şekilde ise transfer aşaması tamamlanmış olan baskı devre kartları görülmektedir.



Şekil 3.13. Grafenin Baskı Devre Kartı Üzerine Transferi



Şekil 3.14. Transfer Sonrası Fotorezistin Aseton İçinde Çözdürülmesi



Şekil 3.15. Transferi Yapılmış Olan Baskı Devre Kartları

4. TESTLER

Tez çalışmasındaki ilk temel amacımız ucuz yöntemler kullanarak kullan-at sensörler elde edebilmektir. Bu amaçtan ötürü baskı devre kartı üzerine grafen tabanlı alan etkili transistörler oluşturularak gelecekte yapılacak olan sensör çalışmalarına alt yapı hazırlanmış oldu. Baskı devre kartı ile grafenin hangi şartlarda uyum sağlayabileceğine yönelik birtakım bilgiler edinildi. Kullanılan grafen numunelerinin kalitesini ve PCB kart ile uyumunu tespit etmek amacıyla Raman Spektrumları alındı. Son aşama olarak da multimetre yardımıyla grafenin baskı devre kartı üzerinde gösterdiği direnç değişimleri gözlemlendi.

4.1. Raman Karakterizasyonu

Raman Spektroskopisi, genellikle bir lazer kaynaktan oluşan tek kromatik ışığın esnek olmayan saçılmasına dayalı spektroskopik bir tekniktir. Burada esnek olmayan saçılma, tek kromatik ışıkta bulunan fotonların frekansının numune ile ışığın etkileşimi sırasında değişmesi anlamına gelmektedir. Lazer ışığın fotonları numune tarafından önce absorbe edilip daha sonra tekrar salınmaktadır. Tekrar salınan fotonların frekansları ilk baştaki tek kromatik ışığın frekansıyla karşılaştırıldığında aşağı veya yukarı kaymalar olduğu gözlenmektedir. Bu durum Raman etkisi olarak isimlendirilmektedir. Bu kaymalar, molekül içerisindeki titreşimler ve düşük frekanslı geçişler hakkında bilgi vermektedir. Bundan dolayı Raman Spektroskopisi katı, sıvı ve gaz numunelerin incelenmesinde kullanılabilir [33-34]. Şekil 4.1'de bahsedilen Raman Spektrometresi görülmektedir.

Işığın elastik olmayan saçılması olgusuna dayanan Raman spektroskopisi, moleküllerin titreşim hareketlerinin belirlemek için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Raman saçılımı infrared absorpsiyonu ile ilişkili titreşimsel değişimlerle aynı türden değişimlerden kaynaklanmaktadır. Gelen ve saçılan ışığın dalga boyları arasındaki fark, orta infrared bölgesindeki dalga boylarına karşılık gelmektedir.

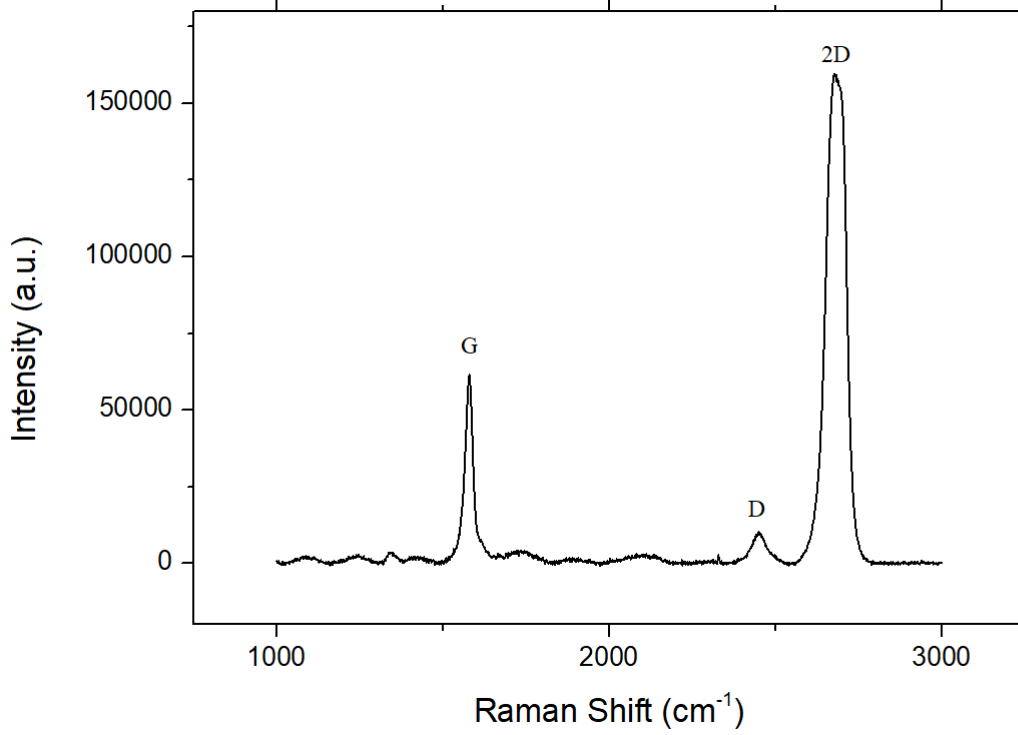


Şekil 4.1. Raman Spektrometresi

Saçılma, oldukça yaygın kullanılan bir teknik olup analizlenecek parçacık boyutunun veya boyut dağılımının 1 mikrondan küçük olduğu durumlarda çokça kullanılır [35].

Karbon allotroplarının elektronik bantlarındaki yüklerinden dolayı 1350^{-1} , 1580^{-1} , 2700^{-1} değerleri civarında sırasıyla G, D ve 2D piklerine sahip oldukları bilinmektedir [36]. Bu piklerin izleri raman spektroskopisi altında gözlemlenebilmektedir. Piklerin özelliklerinin belirlenmesi grafenin tabaka sayısı açısından karakterize edilmesini sağlamıştır. Dahası bu piklerin durumu yapı içindeki kusurlar, sıcaklık ve gerginliğin etkisi, katkı konsantrasyonu hakkında bize bilgi vermişlerdir.

D. Graf ve ark. [37] yapmış olduğu çalışmada grafen tabaka sayısını G ve 2D piklerinin durumlarına bağlı olarak ortaya koymuşlardır. Çalışmaya göre tek tabaka grafenlerde 2D piki, G pikinden daha büyük ve daha keskin bir pike sahip buna karşın çift tabaka grafende G piki 2D pikinden daha büyük ve 2D piki daha geniş olmaktadır. G bandı, Brillouin bölgesinde iki kez dejenere olmuş fonon moduyla ilişkilidir. Bu bant, sp^2 karbon atomlarının düzlemdeki titreşimlerinden dolayı oluşmuştur. Buna karşın 2D bandı, D bandını hemen hemen çift frekanslıdır ve Raman saçılma sürecinde ikinci saçılmadan başlamıştır. Şekil 4.2’de bakır haldeki grafenin raman grafiği bulunmaktadır.



Şekil 4.2. Bakır Haldeki Grafenin Raman Görüntüsü

D bandı atomik dizinin içindeki düzensizliklerin varlığından veya grafenin kenar kusurlarından, içindeki dalgalanmalardan, yük gölcüklerinden dolayı görülmektedir. Grafen tabakalardaki Raman Spektrumunda D pikinin görülmemesi grafen tabakalarda kusurların yokluğunu göstermektedir. Şiddet veya şekildeki önemli değişimler grafen ve grafitin için 2D bandında gözlemlenmiştir. Ferrari ve ark. [36] 2D bandının grafit için 2 parçaya iki tabaka grafen için 4 parçaya ayrıldığını gözlemlemişlerdi. Tabaka sayısı giderek arttığında 2D bandının şiddeti göreceli bir şekilde giderek azalmıştır. Tabaka sayısının artmasıyla grafenin rengi giderek maviye kaymaya başlamıştır. Tek tabaka grafenlerin tek keskin bir 2D pikine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tek tabakada bu pik, G pikinden yaklaşık olarak dört kat daha güçlü (şiddetli) olduğu tespit edilmiştir.

Grafenin özellikleri, tabaka sayısı ve temizliğine önemli ölçüde bağlı olduğu için bir çok araştırmacı tek veya birkaç tabaka grafenin niteliklerinin kontrolü ve incelenmesi için zararsız bir alet olan Raman spektrumunu kullanmışlardır. Raman spektroskopisi, tabaka sayısının belirlenmesinde, tabaka içindeki kusurların ve gerginliğin belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [38].

4.2. Elektriksel Ölçüm

Gate voltajına bağı olarak akım değişiminin gözlenmesi istenmiştir ancak baskı devre kartı üzerindeki pürüzlülük nedeniyle grafenin kart üzerine teması istenilen şekilde gerçekleştirilememiştir. Bu nedenden dolayı sonuçlarda kayma etkisi meydana gelmiş ve kayda değer sonuçlar elde edilememiştir.

Burada baskı devre kartı üzerine transfer edilen grafen üzerinden multimetre yardımıyla direnç okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Grafenin baskı devre kartı yüzeyine tam temas etmemesi sebebiyle penset yardımıyla metal bacaklar üzerinden baskı uygulanarak direnç ölçümü alınmaya çalışılmıştır. Şekil 4.3’de multimetre üzerinden okunan herhangi bir direnç değeri görülmektedir. Grafen üzerine el teması ile yapılan baskı nedeniyle sabit değerler elde edilememiştir ancak grafen temasının olduğu bu şekilde gözlenebilmiştir.



Şekil 4.3. Direnç Ölçümü

5. SONUÇLAR

Tez çalışması sürecinde fizik laboratuvarındaki tez çalışmasıyla alakalı tüm cihazların kullanımı öğrenilmiştir. Bunun yanında grafen üretim süreçleri ve üretim yöntemleri öğrenilmiştir. Ayrıca baskı devre kartı ile grafenin uyumluluk derecesi test edilmiştir.

Çalışma sürecinde grafenin teması ile ilgili birtakım problemler yaşanmıştır ancak ucuz yollu üretim yolu tercih edildiği için bu problemin aşılmasına yönelik çalışmalarda bulunulmamıştır. Ayrıca literatür taramalarında da görüldüğü gibi grafen transistör üretiminde yüksek oranda metal olarak altın kullanımı tercih edilmiştir. Bu çalışmada ise baskı devre kartında bulunan metal yüzeyler üzerindeki grafenin temas oranını daha da artırmak için öncelikle gümüş ve gümüşün üzerine altın kaplama yapılmıştır. Fakat bu kaplamalar sonucunda iletkenlik oranı ve metal yüzeyi artırılmış olmasına rağmen grafenin kart yüzeyindeki teması istenilen boyuta ulaştırılamamıştır.

5.1. Tezin Amacının Doğrulanması

Baskı devre üzerindeki pürüzlü yüzeyin var olması nedeniyle grafenin kontak almasında ciddi anlamda sorun yaşanmıştır. Bu da performansı yüksek bir transistör elde edilmesine engel olmuştur. Uzun vadede ele alındığında ucuz, kullan-at sensörler için ön çalışma oluşturmuştur. Grafen transferi ve transistör yapımı ile bu ön çalışma kısmen sağlanmıştır. Problemin baskı devre kartı yüzeyindeki pürüzlülüğünden kaynaklı olduğunun tespit edilmesinden ötürü bu problemin azaltılmasına yönelik indirgemeler yapılmasının gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Baskı devre kartının daha pürüzsüz hale getirilmesinin maliyete neden olacağından ötürü bu konunun gelecek çalışmalar ile aşılabilecek olması olumlu yönü olarak umut vaad etmektedir.

5.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Grafen ile yapılacak olan çalışmalarda transfer edilecek yüzeyin oldukça pürüzsüz olması gerektiği sonucuna varıldığından ötürü gelecek çalışmalarda pürüzlülüğün kontrol altında olacağı veya kontrol altına alınabileceği lam lamel altaş ya da seramik baskı devre gibi malzemeler tercih edilmelidir. Baskı devre kartı için ucuzluk ön planda olacağı için litografi gibi yöntemlerde çok hassasiyette bulunulmaması gerektiğinin ele alınması gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Tanrıverdi, Çağla, <https://www.webtekno.com/transistor-nedir-nasil-calisir-h102183.html>, 2020
- [2] Şimşek, Ufuk, <https://ufukmarmara.wordpress.com/2016/09/23/gelecegimizin-maddesi-grafen/>, 2016
- [3] Çetinli, Ahmet, <https://www.ceyrekmuhendis.com/grafen-nedir/>, 2018
- [4] Solakoğlu, Gürbüz, <https://malzemebilimi.net/gelecege-yon-veren-malzeme-grafen.html>, 2017
- [5] Leblebicioğlu, Emre, <https://muhendistan.com/grafen-nedir-grafenin-ozellikleri-ve-kullanim-alanlari/>, 2019
- [6] <http://www.openaccess.hacettepe.edu.tr>
- [7] Slonczewski, J. C., Weiss, P.R., Band structure of graphite. *Phys Rev.*, 109: 272, 1958
- [8] Baughman, R.H., Zakhidov, A.A., de Heer, W.A., *Science.*, 297, 787, 2002
- [9] Geim, A. K., Novoselov, K. S., The rise of graphene. *Nature materials.*, Vol: 6, 2007
- [10] Novoselov, K. S., Jiang, D., et. al., Two-dimensional atomic crystals, *PNAS.*, 102, (30): 10451-10453, 2005.
- [11] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., " Electric field effect in atomically thin carbon flims", *Science* 306, 666-669, 2004.
- [12] Teo, G., Wang, H., Visibility study of graphene multilayer structures. *Journal of Applied Physics.*, 103,124302, 2008
- [13] Acarer, Tayfun, <https://tesid.org.tr/grafen>, 2019

- [14] Nanografi, <https://www.nanografi.com.tr/grafen/>
- [15] Nanografi Nano Technology, <https://nanografi.com/blog/applications-of-graphene-in-medicine/>, 2021
- [16] Uğurlu, Berkay, <https://shop.nanografi.com.tr/blografi/grafenin-60-farkli-kullanim-alani/>, 2020
- [17] Bedeloğlu, Ayşe, <https://fenbildergi.aku.edu.tr/wp-content/uploads/2016/12/031203-544-554.pdf>, 2016
- [18] Arslan, Susen, <https://malzemebilimi.net/cvd-kimyasal-buhar-biriktirme-kaplama-nedir.html>, 2019
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Different-steps-involved-in-the-transfer-of-graphene-by-the-wet-chemical-method_fig7_330974455
- [20] Bolza, Miklos, <https://www.graphenea.com/pages/what-are-graphene-field-effect-transistors-gfets>
- [21] <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/fet-mosfet/11345ad-image-0>, 2015
- [22] Klekachev, Alexander V., et al. "Graphene Transistors and Photodetectors." *Electrochemical Society Interface* (2013): 63
- [23] V. Ryzhii, M. Ryzhii, T. Otsuji, *Phys. Status Solidi* 2008, 205, 1527.
- [24] Aguirre-morales J D, frégonèse S, mukherjee C, maneux C, and zimmer T 2015 *IEEE trans. Electron dev.* 62 4333.
- [25] bir b Y Zhang; T Tang; C Girit; Z Hao; MC Martin; bir Zettl; MF Crommie; YR Shen; F Wang (2009). "İki katmanlı grafende geniş ölçüde ayarlanabilen bir bant aralığının doğrudan gözlemi". *Doğa* . 459 (7248): 820–23. Bibcode : 2009Natur.459..820Z . doi : 10.1038/nature08105 . OSTI 974550 . PMID 19516337 . S2CID 205217165 .

- [26] bir b Fiori, Gianluca; Iannaccone, Giuseppe (Mart 2009). "Ayarlanabilir Boşluklu Çift Katmanlı Grafen FET Olasılığı Üzerine". IEEE Elektron Aygıt Harfleri . 30 (3): 261–264. arXiv : 0810.0128 . Bibcode : 2009IEDL...30..261F . doi : 10.1109/led.2008.2010629 . ISSN 0741-3106 . S2CID 9836577 .
- [27] Schwierz, F. (2010). "Grafen transistörleri". Doğa Nanoteknoloji . 5 (7): 487-496. Bibcode : 2010NatNa...5..487S . doi : 10.1038/nnano.2010.89 . PMID 20512128 .
- [28] bir b Fiori, Gianluca; Iannaccone, Giuseppe (Ekim 2009). "Ultra Düşük Gerilim Çift Katmanlı Grafen Tüneli FET". IEEE Elektron Aygıt Harfleri . 30 (10): 1096–1098. arXiv : 0906.1254 . Bibcode : 2009IEDL...30.1096F . doi : 10.1109/led.2009.2028248 . ISSN 0741-3106 . S2CID 2733091 .
- [29] Robosup, <https://sciencealpha.com/tr/double-layer-graphene/>, 2019
- [30] Varol, Zümrüt, <https://www.slideshare.net/Zzmmrrtt/kimyasal-buhar-biriktirme-cvd>, 2014
- [31] İnce Film Kaplama Sistemleri, <https://www.erbakan.edu.tr/bitam/sayfa/7688>
- [32] Yıldız, Bayram, <https://docplayer.biz.tr/110389631-T-c-pamukkale-universitesi-fen-bilimleri-enstitusu-makina-muhendisligi-anabilim-dali.html>, 2016
- [33] Gardiner, D., Practical Raman Spectroscopy, Springer-Verlang., ISBN 978- 0387502540, 1989.
- [34] Harris, D. C., Bertolucci, M. D., Symmetry and Spectroscopy: an introduction to vibrational and electronic spectroscopy, Oxford University, 1978.
- [35] https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/17836/mod_resource/content/0/Ders-14.pdf
- [36] Ferrari, A. C., Meyer, J. C., Scardaci, V., et. al., Raman spectrum of graphene and graphene layers. Phys. Rev. Lett., 97, 187401, 2006.
- [37] Graf, D., Molitor, F., Spatially Resolve Raman Spectroscopy of Sing-and Few-Layer

Graphene. Nano Letters., 7, 238-242, 2006.

- [38] Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., et al., High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite Nat.Nanotechnol., 3, 563- 568,Sep. 2008.

