



T.C.

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ BOYUTLU MALZEME TEMELLİ ALAN ETKİLİ
TRANSİSTÖR GELİŞTİRİLMESİ

Sait ÖZTÜRKMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık - 2020

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sait ÖZTÜRKMEN tarafından hazırlanan " *İKİ BOYUTLU MALZEME TEMELLİ ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR GELİŞTİRİLMESİ* " adlı tez çalışması 14/12/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Hüsnü Deniz BAŞDEMİR

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Üye

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş Durduran

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.

Sait ÖZTÜRKMEN

Tarih: 14/12/2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ BOYUTLU MALZEME TEMELLİ ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR GELİŞTİRİLMESİ

Sait ÖZTÜRKMEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2020, 63 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Doç. Dr. Hüsnü Deniz BAŞDEMİR

İki boyutlu malzemelere olan ilgi son yıllarda hızla artmaktadır. Bunun sebebi de iki boyutlu malzeme kavramının literatürde oldukça yeni konu olmasıdır. Bu çalışmada iki boyutlu malzeme temelli alan etkili transistör (FET) üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu üretim için özgün bir tasarım gerçekleştirilmiş ve bu tasarımın gerçekleştirilmesi için gerekli maske tasarımı Klayout programı yapılmıştır. Bu maske tasarımında elektrotlar arasındaki mesafe, iki boyutlu malzemenin kalınlığı ve kapı elektrodunun genişliği gibi farklı parametrelerde tasarımlar yapılmıştır.

Tasarlanan bu maske ile transistörler üretilmiştir. Yapılan testler sonucunda bir transistörün yaklaşık olarak 27 Volt değerinde dirac gerilimi olduğu gözlemlenmiş ve bu dirac voltajı değerinde 52 kOhm değerinde iç direnç ölçülmüştür.

Necmettin Erbakan Üniversitesi'nde ilk defa iki boyutlu malzemeler kullanılarak transistör üretilmiştir ve bu konuda bilgi ve tecrübe birikimi elde edilmiştir. Bu elde edilen bilgi birikimi ile iki boyutlu malzeme temelli transistörlerle yapılacak sensör gibi uygulamalara temel oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Grafen, GFET, MEMS, İki Boyutlu Malzemeler

ABSTRACT

MS/PH.D THESIS

2-DIMENSION MATERIAL BASED FIELD EFFECT TRANSISTOR FABRICATION

Sait ÖZTÜRKMEN

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

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2020, 63 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN

Assoc. Prof. Dr. Hüsnü Deniz BAŞDEMİR

Interest in two-dimensional materials has been increasing rapidly in recent years. This is because the concept of two-dimensional material is a fairly new topic in the literature. In this study, two dimensional material based field effect transistor (FET) production has been tried to be practiced. An original design was made for this production and the mask design required for the realization of this design was made with the Klayout program. In this mask design, different parameters such as the distance between the electrodes, the thickness of the two-dimensional material and the width of the gate electrode are designed.

Transistors were produced with this designed mask. As a result of the tests, it was observed that a transistor had a dirac voltage of approximately 27 Volts and an internal resistance of 52 kOhm was measured at this dirac voltage value.

Transistors were produced for the first time in Necmettin Erbakan University by using two-dimensional materials and knowledge and experience was gained in this regard. With

this knowledge, the basis for applications such as sensors to be made with two-dimensional material-based transistors was formed.

Keywords: Graphene , GFET, MEMS , 2-Dimension Materials



ÖNSÖZ

Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elekt-ronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan bu çalışmamda danışmanlığımı üstlenen saygıdeğer Prof. Dr. Mehmet Akif Erişmiş hocama teşekkür ederim.

Bu çalışma sürecinde bana yardımını esirgemeyen Mustafa Büyükharman'a ve Mücahit Yılmaz hocama teşekkür ederim. Ayrıca Hamdi Şükür Kılıç ve Yasemin Gündoğdu hocalarıma müteşekkirim.

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

Sait ÖZTÜRKMEN
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. İki Boyutlu Malzemeler	3
1.2.1. Grafen	4
1.2.2. Grafenin Üretim Yöntemleri	6
1.2.2.1. Eksfoliasyon	6
1.2.2.2. Epitaksiyel Büyütme	6
1.2.2.3. Grafen Oksitin İndirgenmesi	7
1.2.2.4. Kimyasal Buhar Biriktirme	8
1.2.3. Grafenin Elektriksel Özellikleri	8
1.3. Grafen Temelli Alan Etkili Transistör	9
1.3.1. Tek Katmanlı GFET	12
1.3.2. İki Katmanlı GFET	14
1.4. Bazı GFET Uygulamaları	17
1.4.1. Gaz Sensörü	18
1.4.2. Rezonatör	19
1.4.3. Fotodetektör	20
2. TASARIM	23
2.1. GFET Tasarımı	23
2.2. GFET Üretim Planlama	24
2.2.1. Metal	25
2.2.2. Yalıtkan	27

2.2.3. Kanal	28
2.3. Maske Tasarımı	28
3. ÜRETİM VE SONUÇ	34
3.1. Üretim Akışı	34
3.1.1. Savak-Kaynak Elektrotları	34
3.1.2. Kapı Elektrodu	37
3.1.3. Grafen Kanalı	38
3.2. Litografi Optimizasyonu	40
3.3. GFET Karakterizasyonu	40
4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	44
4.1. Tez Amacının Doğrulanması	44
4.2. Gelecek Çalışmalar için Öneriler	45
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 İlk transistör [1]	1
1.2 Moore yasası [2]	2
1.3 Grafen yayın ve patent grafiği [7]	5
1.4 Eksfoliasyon yöntemiyle grafen eldesi [12]	6
1.5 Epitaksiyel büyütme yöntemiyle grafen eldesi [13]	7
1.6 Grafen ve grafen oksit [13]	8
1.7 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi(CVD) [15]	9
1.8 MOSFET yapısı [19]	10
1.9 MOSFET sayısının ve boyutunun yıllara göre değişimi [20]	11
1.10 Kanal iletkenliği-kesim frekansı grafiği [22]	12
1.11 Kapı elektrodu altta olan GFET [20]	13
1.12 Kapı elektrodu üstte olan GFET [20]	14
1.13 İki kapılı GFET [20]	15
1.14 a) MOSFET yapısı, c) MOSFET akım gerilim grafiği b) GFET yapısı d) GFET akım gerilim grafiği [23]	15
1.15 Bant aralığı [24]	16
1.16 Bant aralığı karşılaştırması [25]	17
1.17 GFET gaz sensörü [26]	18
1.18 İyonik sıvı ile GFET gaz sensörü [27]	19
1.19 GFET gaz sensörünün dirac gerilimi kıyaslanması [27]	20
1.20 RF MEMS rezonatör [28]	21
1.21 GFET fotodetektör [29]	22
2.1 Tasarlanan GFET yapısı	24
2.2 GFET üretim aşamaları	25
2.3 Aşındırma yöntemiyle metal elektrotların üretimi	26
2.4 Lift-off yöntemiyle metal elektrotların üretimi	26
2.5 Kapı elektrodunun üretilmesi	27
2.6 Grafen transferi	29
2.7 GFET üretiminin yapıldığı lam	30

2.8	Bakırın lazerle kazınarak oluşturulan maske test yapıları	30
2.9	Asetat kağıda bastırılmış maske	31
2.10	GFET maskenin üstten görünümü	32
2.11	Lift-off yöntemi için kullanılan maske	32
2.12	a) Maske test yapıları b) Hizalama yapıları	33
3.1	Termal kaplama cihazı	35
3.2	BİTAM'da altın-palladyum kaplama	36
3.3	Altın ve alüminyum aşındırılmış örnek	38
3.4	Üretilmiş elektrotların mikroskop görüntüsü	39
3.5	CVD cihazı	39
3.6	Pozlama ve hizalama cihazı	40
3.7	a) GFET ölçüm bacakları b) GFET test düzeneği	41
3.8	GFET akım gerilim grafiği	42
3.9	GFET gerilim-direnç grafiği	43

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 GFET Boyutları	33



SİMGELER VE KISALTMALAR

GFET : Grafen Temelli Alan Etkili Transistör

MEMS : Mikro Elektro-Mekanik Sistemler

MOSFET: Metal Oksit Alan Etkili Transistör

RF : Radyofrekans

2B: 2 Boyutlu

PLD :Pulsed Laser Deposition



1. GİRİŞ

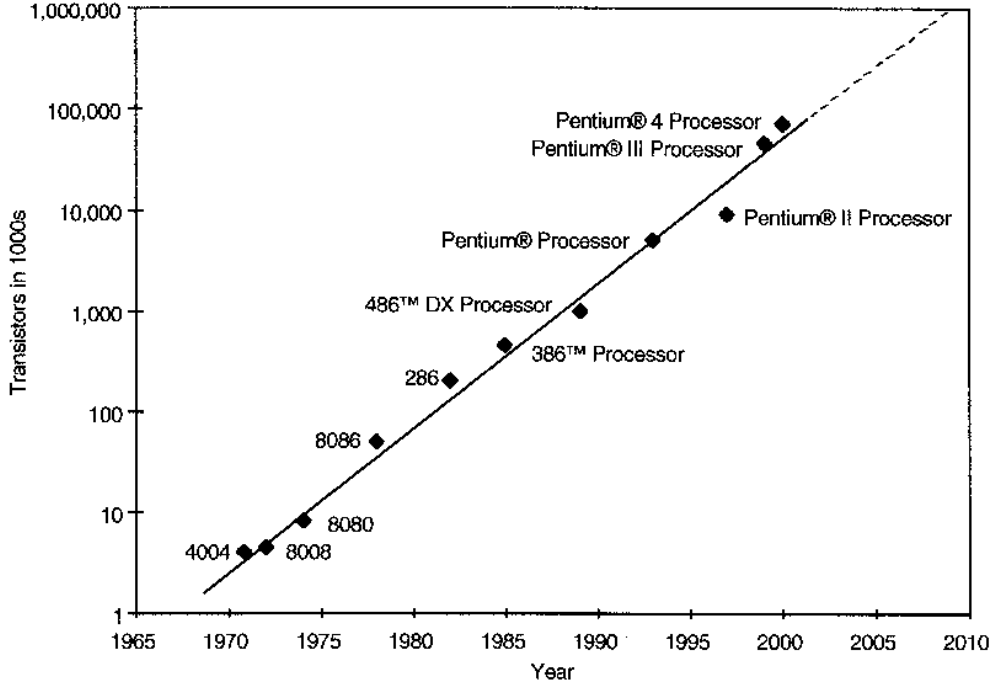
Son yıllarda elektronik endüstrisinde yaşanan gelişmeler hayatımızı oldukça etkilemektedir. Geçmiş 100 yıl bile olmayan bu sektörün bu kadar gelişmesinde yapılan araştırmaların yoğunluğu da oldukça önemli. Elektronik endüstrisi ulaşımdan sanayiye savunma sektöründen haberleşmeye kadar hayatın her alanını her geçen yıl daha çok etkilemektedir. Elektronik endüstrisinin temeli ilk transistörün icadına dayanmaktadır. Transistör, akım ile gerilimi kontrol edebilmemizi sağlayan, gereksini-me göre hiç akım geçirmeyen ve gereksinime göre de maksimum akım geçiren 3 bacaklı bir elektronik elemandır. Şekil 1.1'deki transistör 1947 yılında üretilen ilk transistördür. İlk transistörün üretiminde germanyum yarıiletkeni kullanılmıştır [1].



Şekil 1.1. İlk transistör [1]

Transistöre yarıiletken kullanılmasının nedeni de bant aralığına sahip

olmalarındır. En yaygın kullanılan yarıiletkenler silisyum ve germanyumdur. İlk transistörün üretiminden sonra elektronik endüstrisinde araştırmalar yoğun bir şekilde başlamıştır ve her geçen yıl üretilen transistörün boyu küçülmüştür. Aynı zamanda aynı boyuttaki çipte bulunan transistör sayısı da artmıştır. Bu gelişmelere ilişkin 1965 yılında Gordon Moore kendi ismini taşıyan bir yasa ortaya çıkarmıştır. Moore Yasası'na göre bir tümleşik devre üzerindeki bileşen sayısı her 18 ayda iki katına çıkacaktır ancak üretim maliyetleri sabit kalacaktır. Bu da demektir ki her 18 ayda transistörün boyutu yarıya düşecektir. Şekil 1.2'de Moore Yasası'nın doğruluğunu kanıtlayan tümleşik devrelerdeki transistör sayısını gösteren grafik görülmektedir. Grafiğe baktığımızda çok az bir farklılıkla yasanın yıllar boyu tutarlı kaldığı gözükmemektedir [2].



Şekil 1.2. Moore yasası [2]

Günümüze geldiğimizde transistörlerin boyutu nanometre boyutuna kadar küçülmüş bulunmaktadır ve bir çip üzerinde milyarlarca transistör bulunmaktadır. Moore yasasının doğruluğunun devamı için transistörlerin boyutlarının küçültülmeye devam etmesi gerekmektedir ancak silisyum yarıiletkeniyle bunun daha fazla mümkün olmayacağı bilinmektedir. Bu sebepten dolayı bilim dünyası başka malzemelere yönelmek zorunda kalmıştır. Gelecekte transistörlerde iki boyutlu

malzemelerin kullanılacağı tahmin edilmektedir. 2004 yılında grafenin bulunmasıyla grafenin gelecekte silisyumun yerini alması öngörülmektedir. Silisyumun sınıra ulaştığının düşünülmesi ve grafenin bulunmasıyla grafen temelli FET transistörler üzerine yoğun çalışma gerçekleştirilmektedir ve yapılan çalışmalar da tıpkı Moore Yasası'nın grafiğine benzer şekilde hızla artmaktadır. Grafen ilk keşfedildiği zaman bilinen ilk iki boyutlu malzeme idi ancak daha sonrasında molibden disülfid ve silisen gibi başka iki boyutlu malzemeler de keşfedildi. Grafen gibi iki boyutlu malzemelerin transistör üretiminde tercih edilmelerinin birçok sebebi bulunmaktadır. Bunların en önemlileri, yüksek iletkenlik, esneklik ve küçük boyutlu olmasıdır. Ayrıca grafene özel olarak karbon atomlarının iyi bir tutucu olmasından dolayı sensör teknolojilerinde kullanılması da başka bir tercih sebebidir.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasıyla üniversitemizde ilk defa iki boyutlu malzemeler kullanarak transistör üretilmesi hedeflenmiştir. Disiplinler arası olan bu çalışma ile hem üniversitemizin Fizik Bölümü'nün kabiliyetlerinden faydalanılmaya çalışılmış hem de temiz alanın üretim kabiliyetinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca bu çalışma sonucunda üretilecek olan GFET ile gelecekte yapılması muhtemel sensör gibi uygulamaların altyapısı yapılmış olacaktır. Bununla beraber litografi optimizasyonu, metal elektrotların optimizasyonu ve iki boyutlu malzemenin transferi gibi üretim süreçlerinden edinilen deneyim sonraki çalışmalarda kullanılabilir.

1.2. İki Boyutlu Malzemeler

20. yüzyılın ilk yıllarında, iki boyutlu (2B) malzemelerin varlığı fizik camiasında oldukça tartışılan bir konuydu. Klasik fiziğe göre, 2B malzemeler termal dalgalanmaları nedeniyle herhangi bir sonlu sıcaklıkta termodinamik olarak kararsızdır [3]. Bu, ince filmlerin kalınlığı azaldığında gözlemlenen azalan erime sıcaklığı ile uyumluydu. Modern spektroskopinin gelişimi, grafit ve molibden disülfür

gibi 3 boyutlu malzemelerin katmanlı yapıya sahip olduğunu ortaya çıkardı. İki boyutlu tek katmanlarına kadar eksfoliasyon olmalarının yalnızca teorik alanda mümkün olduğu düşünülürdü ve gerçekte bunun olmayacağı varsayıldı. Ancak malzeme bilimi 2004 yılında büyük bir devrim yaşadı. Novoselov ve Geim grafitin katmanlarını ekfoliasyon yaparak tek katmanlı grafiti yani grafeni keşfettiler [4]. Bu başarılarından dolayı da 2010 yılında da Nobel ödülünü almaya hak kazandılar.

Eksfoliasyon tekniklerindeki son gelişmelerle birlikte grafen ve diğer iki boyutlu malzemelerin keşfi, herhangi bir katmanlı üç boyutlu malzemeden tek katmanlı levhaların üretimi için temelleri oluşturdu. Gelişen bu tekniklerle birlikte neredeyse çok farklı özelliklerde iki boyutlu malzemeler üretililebilir. Bu, görünür aralık da dahil ultraviyole ile kızılötesi arasında değişen doğrudan ve dolaylı bant boşluklarına sahip metaller, yarı metaller, yalıtkanlar ve yarı iletkenler dahil olmak üzere zengin bir elektronik özellik çeşitliliği sağlar. Bu nedenle, nanoelektronik, optoelektronik ve yeni ultra ince ve esnek cihazların geleceğinde temel bir rol oynama potansiyeline sahiptirler.

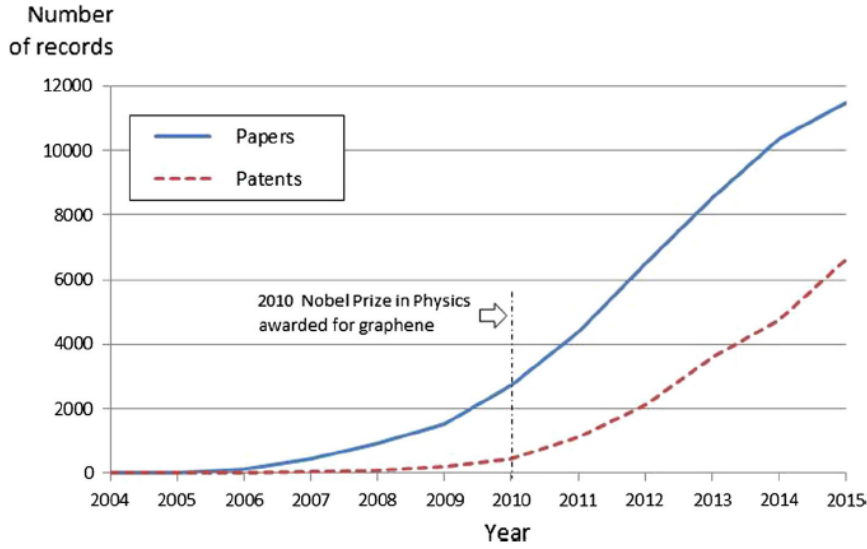
Yeni nesil elektronik cihazların daha küçük, daha hızlı ve daha verimli olması ancak ve ancak malzeme ve nanoteknoloji biliminin gelişmesinin devamıyla olacaktır. Çünkü silisyumun fiziksel limitlerine ulaşmak üzereyiz. Zaman yeni alternatif bulma zamanı. İki boyutlu malzemeler, silisyumun yerini almaya en yakın olan malzemelerdir.

1.2.1. Grafen

Grafen, iki boyutlu bir karbon allotropudur. Grafen, diğer karbon allotroplarının temeli olarak görülebilir; yuvarlanmış grafen karbon nanotüp haline gelir, onlarca yığılmış grafen katmanı grafit oluşturur ve toplanmış grafen fulleren oluşturur.

Grafen, 1940'lardan beri tamamen teorik biçimde var olmuştur [5]. Ancak 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov grafenin gerçekten olabileceğini ispatlamıştır. Grafen, grafitten bir katmanın soyulup silikon pula aktarılmasıyla elde edilmiştir. Dünyadaki ilk iki boyutlu malzemenin keşfi, grafen üzerine büyük bir araştırma çabasına yol açtı. Dahası, iki boyutlu malzemelerin keşfi malzeme

biliminde yepyeni bir araştırma alanını teşvik etti ve grafeni hızla diğer iki boyutlu malzemeler olan molibden disülfid ve silisen izledi. Grafendeki alan etkisi 2004 yılında grafenin keşfiyle beraber gösterilmişti ve grafen alan etkili transistörler hızla aktif bir araştırma konusu haline geldi. Yaklaşık on yıl içinde, grafen transistörler tek bir transistörden tamamen işlevsel bir grafen temelli entegre devreye gelişim gösterdi [6]. Şekil 1.3'te grafen ile ilgili yapılan yayın ve patent sayısını göstermektedir. Son yıllardaki yayın ve patent sayısında üstel bir artış gözükmektedir [7].



Şekil 1.3. Grafen yayın ve patent grafiği [7]

Grafen sıradışı özellikleri sayesinde birçok uygulamada kullanılmaya elverişlidir. Grafenin ısı iletkenliği oda sıcaklığında yaklaşık $5 \cdot 10^3 \text{ W / mK}$ civarında olup bu değer silikonun ısı iletkenliğinden yaklaşık 30 kat daha fazladır [8]. Isı iletkenliği elektronik uygulamalar için çok önemlidir. Grafen ayrıca son derece dayanıklı ve optik olarak neredeyse saydamdır. Grafenin mekanik özellikleri de benzersizdir, grafenin kırılma mukavemeti çeliğinkinden çok daha fazladır ve elastik özellikler elmasla karşılaştırılabilir.

Çok temiz grafen örnekleri Shubnikov-de Haas salınımları [9], minimum iletkenlik [10] ve kesirli kuantum Hall etkisi [11] göstermektedir. Mükemmel malzeme özelliklerine rağmen, grafenin elektronik bant boşluğu yoktur. Birçok elektronik uygulamalarda düşük güç tüketimine ulaşmak için bir bant aralığı gereklidir. Ancak iki kat grafen, yani iki katmanlı grafen, bir elektrik alanı çift

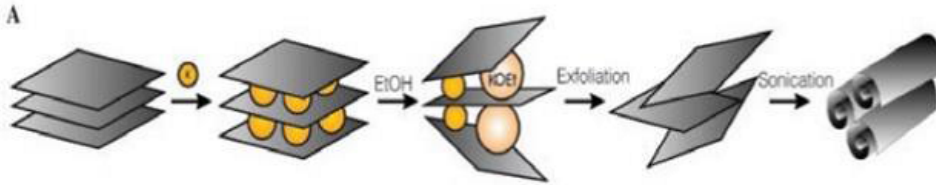
katmana dik olarak uygulandığında, 300 meV mertebesinde küçük ama önemli bir enerji boşluğuna sahip olabilir.

1.2.2. Grafenin Üretim Yöntemleri

Grafen elde etme yöntemleri fiziksel ve kimyasal teknikler olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel teknikler, çok katmanlı pirolitik grafit kristalinin mikromekanik bölünmesini (eksfoliasyon) ve silikon karbür üzerinde epitaksiyal büyümeyi içerir [9]. Kimyasal yöntem olarak ise ince film nikel veya bakır metaller üzerine kimyasal buhar biriktirme (CVD) kullanılmaktadır. Kimyasal yöntemler, ayrıca grafitten elde edilen grafen oksidin indirgenmesini de içerir.

1.2.2.1. Eksfoliasyon

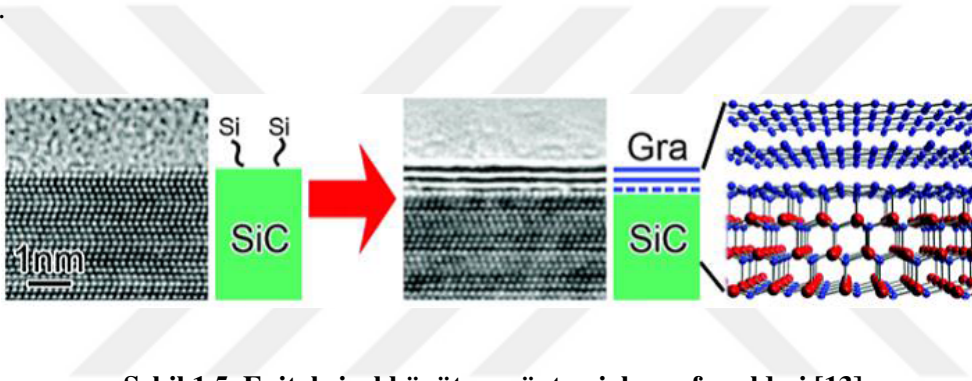
Grafit, grafen tabakalarının van der waals bağlarıyla üst üste bağlanması halindedir. Bu van der waals bağları kırılarak grafen elde edilebilir. Bu bağları kırmak için farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerden bir tanesi eksfoliasyon yöntemidir. Bu yöntemde grafit ve potasyum belli bir oranda 200 derece sıcaklıkta karıştırılır potasyumun grafen tabakalarının arasına girmesi sağlanır. Bu oluşan karışım daha sonra etanol içerisine konulur. Etanol ve potasyum arasında gerçekleşen tepkime sonucu grafen tabakaları birbirinden ayrılır. Uygulanan yöntemin süreci Şekil 1.4'te gösterilmiştir [12].



Şekil 1.4. Eksfoliasyon yöntemiyle grafen eldesi [12]

1.2.2.2. Epitaksiyel Büyütme

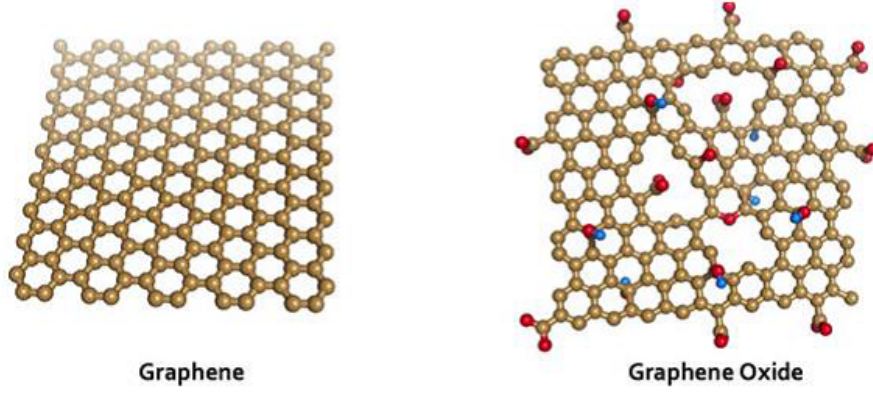
Epitaksiyel büyütme, grafenin silisyum karbür üzerine büyütülmesi işlemidir. Bu yöntemde büyütme şartlarını da göz önünde bulundurarak silisyum karbür tabakası 1000 ila 2000 derece arası bir sıcaklığa ısıtılır. Bu yüksek sıcaklıkta silisyum salınması görülür ve geriye kalan karbonlar bir araya gelir. Bu karbonların birleşmesi sonucu grafen oluşur. Karbon kaynağı olarak silisyum karbür kullanıldığından dolayı yeni oluşan grafen katmanları ilk katmanın altında kalır ve çok katmanlı grafen üretilir. Bu yöntemin dezavantajı ise her yeni katman oluşurken silisyum kaçacak yer bulamaz ve doğal olarak büyütme sona erer. Aşağıdaki Şekil 1.5'te üretim prosesi gözükmemektedir [13].



Şekil 1.5. Epitaksiyel büyütme yöntemiyle grafen eldesi [13]

1.2.2.3. Grafen Oksitin İndirgenmesi

Grafitin oksitlenerek tabakalarından ayrılmasıyla grafen oksit elde edilir. Elde edilen grafen oksitin C/O oranı yaklaşık olarak 2'ye yakındır. Sonrasında grafen oksit indirgenerek grafen elde edilir. Grafen oksit termal, kimyasal, mikrodalga gibi birçok yöntemle indirgenebilir [14]. Bu yöntemin avantajı ucuz ve kolay yapılabilmesidir. Dezavantajı ise elde edilen grafende hala oksijen atomu vardır ve yapısında da bozukluk vardır. Saf grafen elde etmek mümkün değildir. Aşağıdaki Şekil 1.6'da görülebileceği gibi elde edilen grafenin yapısı üniform değildir [13].

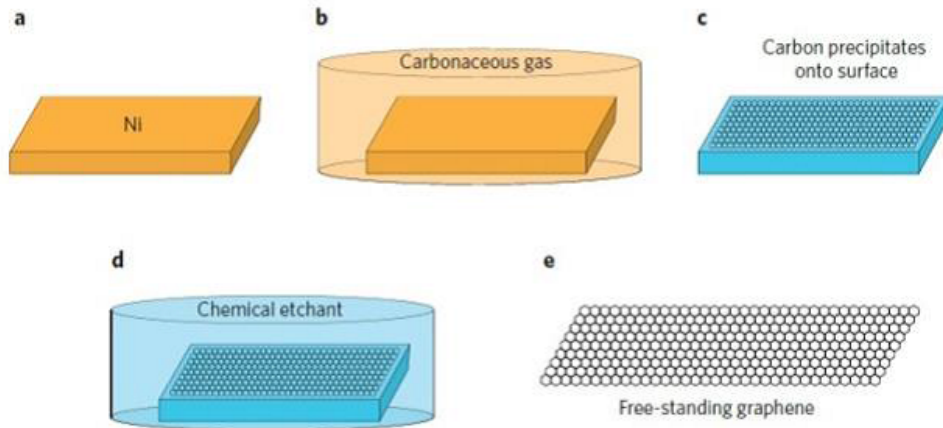


Şekil 1.6. Grafen ve grafen oksit [13]

1.2.2.4. Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi bizim grafen üretmede kullandığımız yöntemdir. Temiz alanda bulunan CVD cihazıyla istediğimiz boyutlarda grafen elde edilmektedir. Bu yöntem, kapalı bir kaptaki ısıtılmış malzeme yüzeyinin yine o kaptaki bulunan gaz molekülleriyle tepkimeye girmesi ve bu tepkime sonucunda malzeme yüzeyinde gaz moleküllerinin birikmesi yöntemidir. Yöntem temel olarak geçiş metalleri üzerinde buhar halinde bulunan karbon atomlarını biriktirmeye dayanır. Geçiş metalleri nikel, paladyum, bakır olabilir. Bu metaller üzerindeki grafeni kullanacağımız ortama aktarmak için öncelikle üzerine fotorezist veya türevi kimyasal madde serilir. Sonra ısıtılarak fotorezistin grafene yapışması sağlanır. Sonra üzerinde karbon biriktirilen metal aşındırılır ve grafen üzerinde fotorezist elde edilmiş olur. Bu şekilde transferini gerçekleştirdikten sonra da fotorezist kaldırılır ve sadece grafen kalmış olur. Karbon kaynağı olarak metan gibi hidrokarbonlar kullanılır. Üretim süreci Şekil 1.7’de gösterilmiştir [15].

Grafen elde etme yöntemleri arasında en ucuz ve tekrarlanabilir yöntemdir. Bu yöntemde kusursuza yakın grafen üretilebilir. Ancak dezavantajı ise bu yöntemle üretmek için pahalı cihazlara ihtiyaç vardır.



Şekil 1.7. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi(CVD) [15]

1.2.3. Grafenin Elektriksel Özellikleri

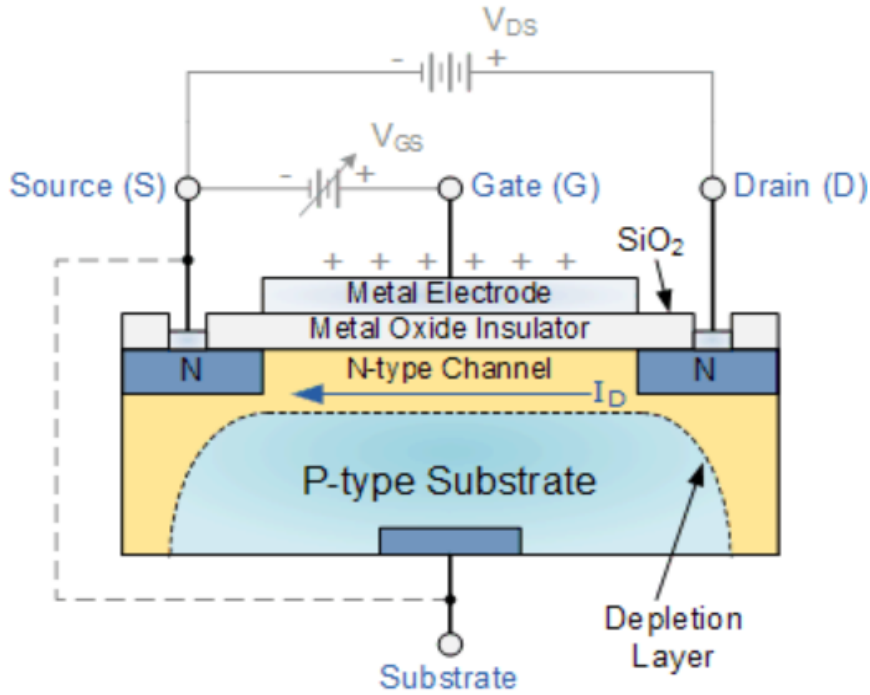
Grafenin en çok bilinen avantajı, oda sıcaklığında yüksek taşıyıcı hareketliliğidir. Eksfoliasyondan elde edilmiş grafenin mobilitesi $10,000-15,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ ölçülmüştür ve $40000-70000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ arasında bir mobilite olabileceği de üst limit olarak tahmin edilmiştir [16]. Bu veriler grafenin açık ara bilinen en iyi iletken olduğunun ispatıdır. Bu yüksek iletkenlik bir çok yeniliğin de habercisidir.

Grafen mükemmel elektronik özellikler göstermesine rağmen, yasak bant aralığı olmaması yani sürekli iletimde olması, özellikle iyi bir anahtarlama oranına sahip transistörlerin gerekli olduğu yerlerde grafen temelli elektroniklerin kullanımı sınırlanır. Silisyum teknolojisinin en büyük avantajlarından biri kollektör akımının sınırlanabilmesi ve güç tüketiminin minimuma indirgenebilmesidir. Lojik devrelerde anahtarlama yapabilmek için en az $400-500 \text{ meV}$ bant aralığı gerekmektedir [17].

Ancak birkaç yöntemle grafene bant aralığı oluşturulabilir. Bunlardan bir tanesi iki katmanlı grafene dik bir şekilde elektrik alan uygulayarak 130 meV büyüklüğünde bir bant aralığı oluşturulmasıdır [18]. Ancak iki katmanlı grafen de iki kapılı transistörde kullanılabileceğinden ticari değeri şimdilik düşüktür.

1.3. Grafen Temelli Alan Etkili Transistör

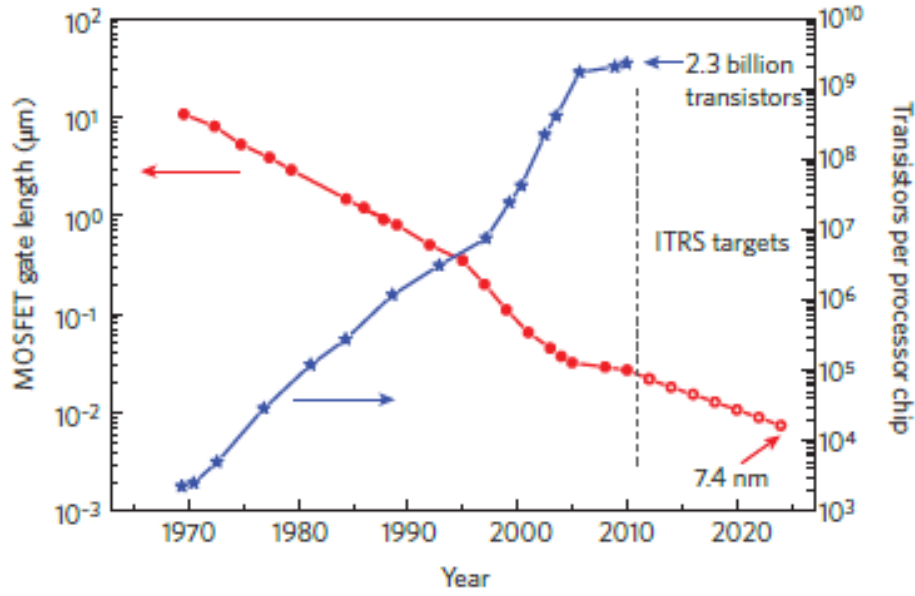
Bir alan etkili transistör (FET), bir kapı, kaynak ve savak elektrotlarını bağlayan bir kanal bölgesi ve kapıyı kanaldan ayıran bir yalıtkandan oluşur. Alan etkili transistörün fonksiyonu en temel olarak kanal iletkenliğini ve savak akımını kapı ve kaynak elektrotlarına uygulanan gerilim (V_{GS}) ile kontrol etme işlemidir. Şekil 1.8’de FET yapısı görülmektedir [19].



Şekil 1.8. MOSFET yapısı [19]

Genel olarak yarıiletken elektroniğini lojik, yükselteç ve analog olmak üzere üç temel başlıkta inceleyebiliriz. Yıllardır FET’leri küçültmek lojik sistemlerde ilerlemenin en önemli anahtarı olmuştur. Moore kuralına göre aynı birim alanda kullanılan cihaz sayısı yani transistör sayısı yaklaşık olarak 18 ayda iki katına çıkmaktadır. Şu anda kompleks bir devrede kullanılan transistör sayısı Şekil 1.9’da görüldüğü gibi 2.3 milyarı bulmuştur ve kapı genişliği 7.4 nanometreye kadar düşmüştür [20].

Yüksek hızlı uygulamalar için, FET’ler (V_{GS})’deki değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt vermelidir; bu, kanalda kısa kapılar ve hızlı taşıyıcılar gerektirir. Ancak

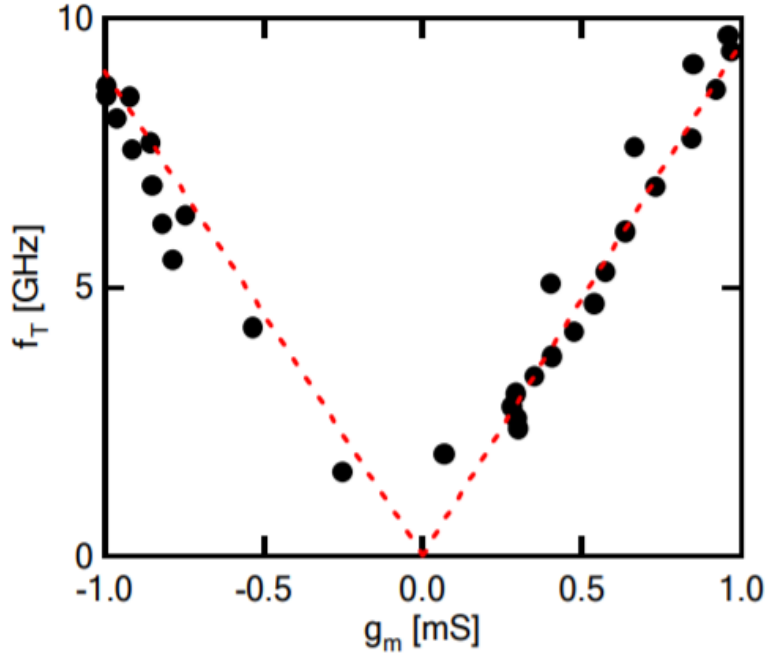


Şekil 1.9. MOSFET sayısının ve boyutunun yıllara göre değişimi [20]

kanal kısa olursa kısa kanal etkileri olarak da bilinen birçok problem ile birlikte gelmektedir [21]. Bununla birlikte, bilim insanları MOSFET'in küçültülmesinin sınırlarına yaklaşıldığını ve uzun vadede, performansın artmaya devam etmesini sağlamak için yeni malzeme ve cihaz konseptlerinin geliştirilmesi gerektiğini savunmaktadırlar.

Yükseltme uygulamalarında ise durum biraz daha farklıdır. Yükseltme uygulamalarında anahtalamanın şart olmadığı için GFET çalışmaları bu alanda daha çok yoğunlaşmıştır. Yükseltme devrelerinde en önemli unsurlardan biri transistörlerin kesim frekansı değeridir. Kesim frekansını etkileyen en önemli iki etken kanal uzunluğu ve kanal iletkenliğidir. Grafen bilinen en iyi iletken olduğu için aynı uzunlukta silisyum kanaldan çok daha iletken olacağından kesim frekansı da oldukça yüksektir. Şekil 1.10'da kanal iletkenliği ve kesim frekansının doğru orantılı olduğu görülmektedir.

GFET tıpkı MOSFET gibi kapı gerilimiyle uyarılmaktadır. Her ne kadar akım-gerilim grafikleri birbirine benzemese de GFET için dirac voltajından daha yüksek kapı geriliminde akım da artmaktadır. Bu da kazanç gerektiren analog devrelerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 1.10. Kanal iletkenliği-kesim frekansı grafiği [22]

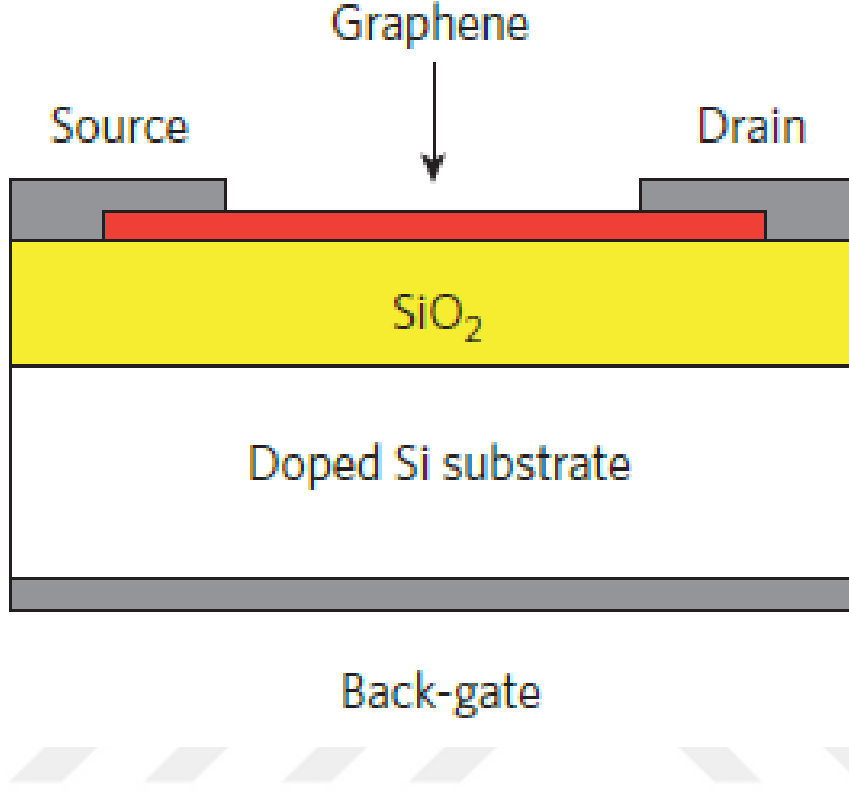
Bu sebeplerle grafen, gelecek vaat eden taşıyıcı taşıma özellikleri ve tamamen iki boyutlu yapısı nedeniyle potansiyel olarak radyofrekans uygulamaları için uygundur. Bu, radyofrekans elektronik endüstrisinin yeni malzemelere göreceli açıklığı ile birleştiğinde, grafenin gelişme alanı lojik sistemlerden ziyade radyofrekans sistemlerde olacağı aşikardır.

Daha önce de bahsedildiği gibi GFET'in MOSFET'ten tek farkı kanalda silisyum yerine grafen kullanılmasıdır. Bu grafen kanalı tek katmanlı, iki katmanlı veya çok katmanlı olabilmektedir. Aşağıdaki başlıkta GFET'in üretilme seçenekleri anlatılmıştır.

1.3.1. Tek Katmanlı GFET

Bir FET için kapı, kaynak, savak elektrotları, kanal ve kapı elektrodunu yalıtkan malzeme ile yalıtılması gerekmektedir. GFET için de aynı durum söz konusudur. Bir GFET tasarlarken öncelikle yalıtkan bir malzeme kullanılacak mı

yoksa silisyum pul yalıtkan olarak mı konumlandırılacak. İkinci seçeneği düşünürsek kapı elektrodunun Şekil 1.11’de görüldüğü gibi altta olması gerekir [20].

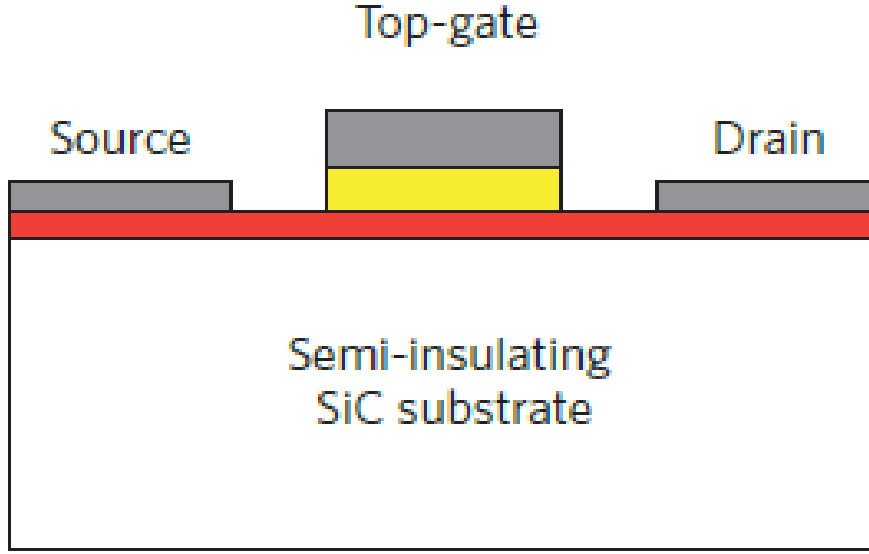


Şekil 1.11. Kapı elektrodu altta olan GFET [20]

Bu üretim açısından kapı ile kanal arasında yalıtkan malzeme koyma maliyetinden kurtarır çünkü pul burada yalıtkan görevi görmektedir ve kapı ile kanal arasında yalıtım yapmaktadır. Bu yöntemle yalıtkan malzemeden maliyetinden kaçınılmış olunur ancak diğer taraftan da GFET esnekliğini kaybetmiş olur. Grafen esnek bir malzeme olduğu için esnek bir FET elde edilebilmektedir ancak bu şekilde bir tasarımda bu çok zordur.

Diğer tasarım yöntemi olarak ise kapı elektrodu ile kanal arasında Şekil 1.12’de görüldüğü gibi yalıtkan malzeme eklenmesidir [20]. Bu tasarımda dikkat edilmesi gereken kısım kanal ile kapı elektrotlarının kısa devre olmamasıdır. Bu diğer yöntemle göre bir yalıtkan maliyeti getirirse de bu yöntem en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemle esnek cihazlar üretilebilmektedir.

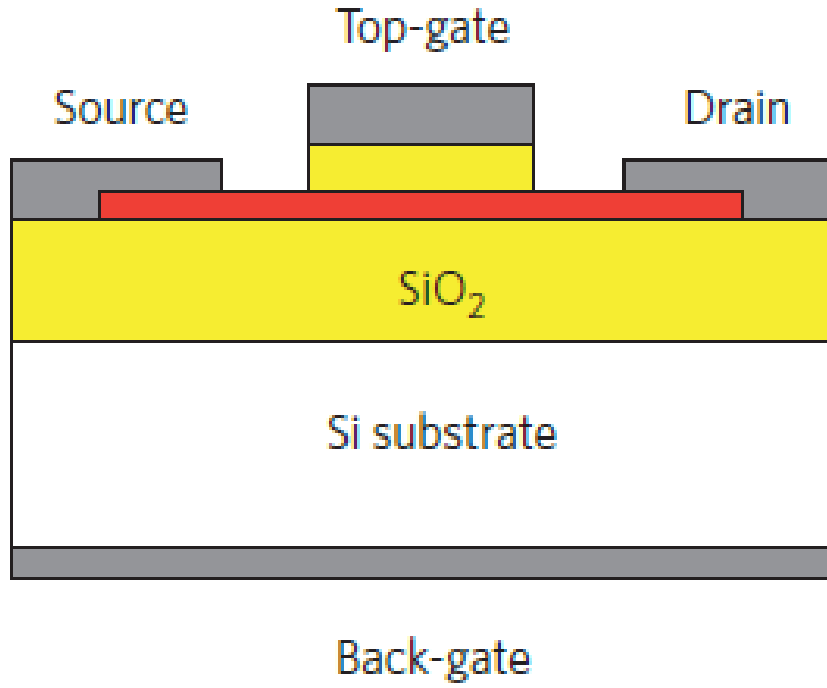
Bir diğer tasarım şekli de çift kapılı yani hem altta hem üstte kapı elektrodu olan yöntemdir. Şekil 1.13’te görüldüğü gibi iki tane kapı elektrodu vardır [20]. Bu



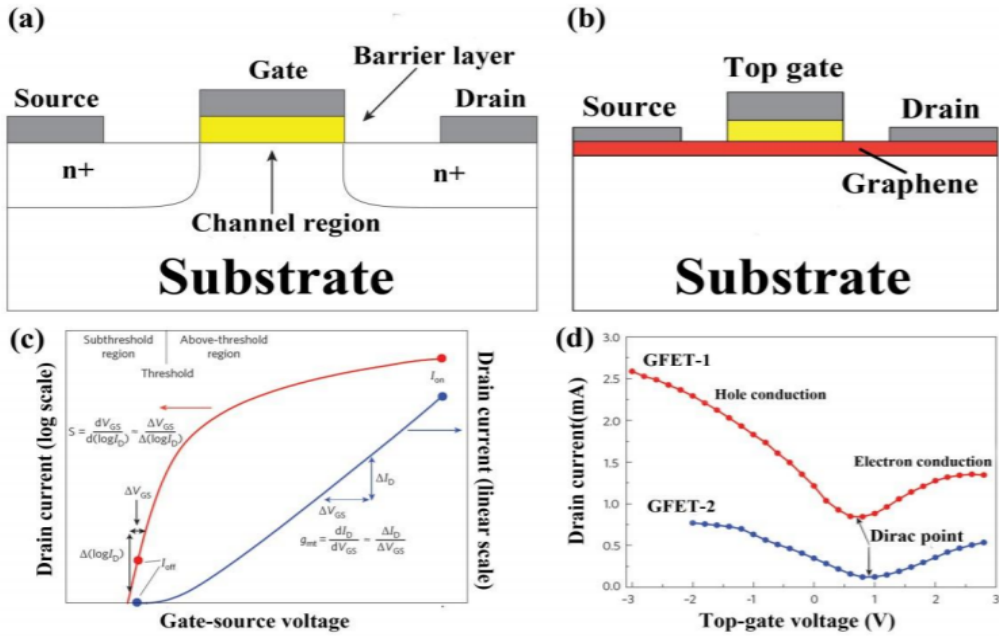
Şekil 1.12. Kapı elektrodu üstte olan GFET [20]

tasarımda hem yalıtkan malzemeye ihtiyaç vardır hem de esnek cihaz yapılması çok zordur. Çift kapılı GFET tasarımı çok tercih edilen bir yöntem değildir.

Bir tek katmanlı GFET'i karakterize etmek için akım-gerilim grafiği çıkarılır. GFET'in akım gerilim grafiği MOSFET'in akım-gerilim grafiğinden çok farklıdır. MOSFET'lerde eşik gerilimi vardır ve kapı gerilimi bu eşik geriliminden fazla olmadıkça MOSFET'ten akım akmaz. Bu eşik gerilimini geçince de lineer bölge denilen bir bölgede akım çok hızlı artar ve sonrasında doyum noktasına ulaştınca da neredeyse sabit akım akar. GFET'te ise dirac gerilimi adı verilen bir gerilim değeri bulunmaktadır. Bu dirac gerilimi daha düşük kapı gerilimi uygulanırsa grafen kanal p-tipi katkılanmış gibi iletimde olur yani iletimi delikler ile yapar. Kapı gerilimi dirac gerilimine eşit olduğu yerde maksimum direnç veya minimum iletkenlik hali vardır. Kapı geriliminin dirac geriliminden fazla olduğu bölgede ise grafen kanal n-tipi katkılanmış gibi yani elektronlar vasıtasıyla iletim yapmaya başlar. Kusursuz bir GFET üretiminde dirac geriliminin 0 olması beklenir ancak pratikte bu değer sıfır olmasa da sıfıra ne kadar yakın olursa o kadar verimli olur. Şekil 1.14'te görüldüğü gibi GFET yapısı MOSFET'e benzese de akım-gerilim grafiği karakteristiktir [23].



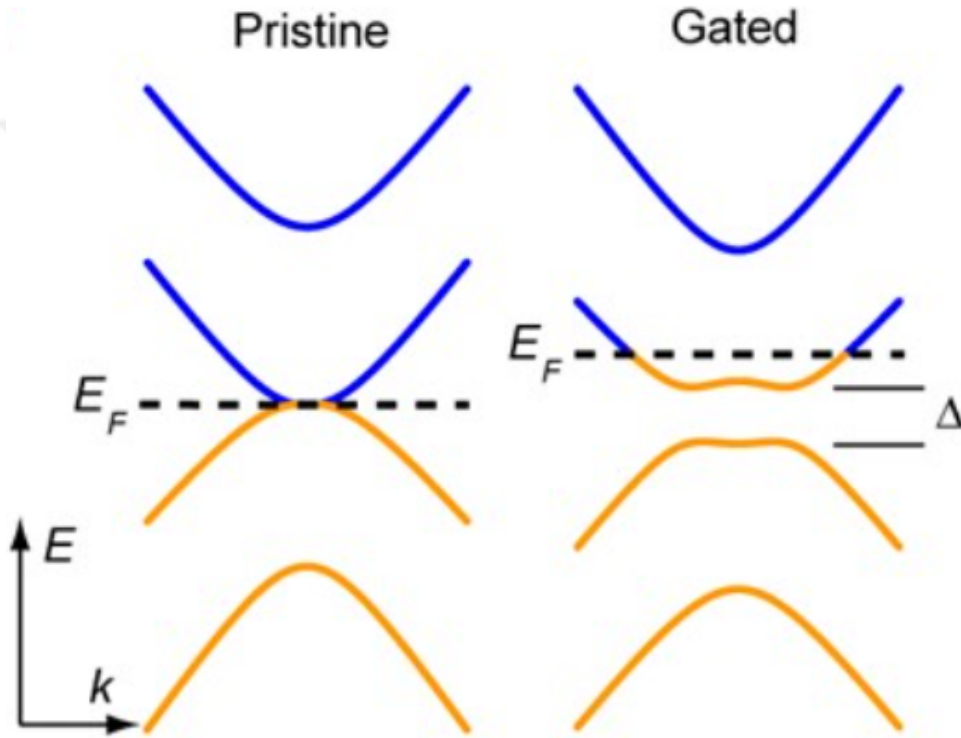
Şekil 1.13. İki kaplı GFET [20]



Şekil 1.14. a) MOSFET yapısı, c) MOSFET akım gerilim grafiği b) GFET yapısı d) GFET akım gerilim grafiği [23]

1.3.2. İki Katmanlı GFET

Tek katmanlı grafen FET'in bant aralığı olmadığı için lojik devrelerde elverişli değildi. Bir bant aralığı oluşturabilmek için iki tane grafen aralarında boşluk olacak şekilde üst üste konular ve iki katmanlı grafen FET elde edilir. İki katmanlı grafenin benzersiz bir özelliği, Şekil 1.15'te gösterildiği gibi iki katman arasındaki potansiyel bir farkı tasarlayarak ayarlanabilir bir enerji bandı boşluğu açabilmesidir [24].



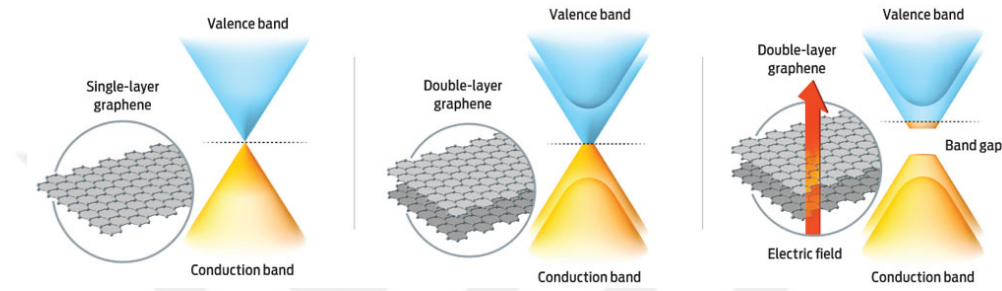
Şekil 1.15. Bant aralığı [24]

İki katmanlı grafen, ayarlanabilir bir bant boşluğuna sahip olan bilinen tek malzemedir [25]. Bant aralığı oluşturmanın iki farklı yöntemi vardır. Bunlardan ilki katmanlar arasına dik gelecek şekilde elektrik alan uygulanır. Diğer bant aralığı oluşturma yöntemi ise dış bir katkı maddesi kullanmaktır.

Birinci bant aralığı açma yönteminde gate elektrodu, bir elektrik yer değiştirme alanının üretilmesi için kullanılır. Bu yöntemde, iki katmanlı grafen ile doğrudan temas halinde olan bir dış kapı yığını iki katmanlı transistor düzlemine dik bir elektrik yer değiştirme alanı oluşturmak için kullanılır. Bu elektrik alan, iki grafen

katmanı ü-zerinde iki farklı aşırı yük yoğunluğunu indükler, böylece iki katman arasında bir yük yoğunluğu asimetrisini indüklemiş olur. İki asimetrik yük arasındaki coulomb etkileşimi, iki katmanlı grafen bant diyagramındaki iletkenlik ve değer enerji bantları arasında bir bant boşluğunun açılmasına neden olur. 250 meV'lik bir optik bant aralığı kızılötesi spektroskopisi ile ölçülmüştür [25].

Şekil 1.16'da görüldüğü üzere tek katmanlı ve iki katmanlı grafende bant aralığı olmamaktadır [25].



Şekil 1.16. Bant aralığı karşılaştırması [25]

Ancak iki katmanlı grafene elektrik alanı uygulandığında bant aralığı oluşuyor. Ayarlanabilen bant genişliği olması çok önemli bir avantajdır. 300 meV bant aralığı elde etmek için, uygulanan elektrik alanın 3.5 V / nm'den büyük olması gerekir. İki katmanlı grafene bu kadar elektrik alan uygulandığında yük yoğunluğu 10^{13} cm^{-2} 'yi geçmektedir [25]. Bu nedenle transistörü kapatmak ve fermi seviyesini bant aralığına getirmek için çok yüksek bir elektrik deplasman alanı oluşturulmalıdır.

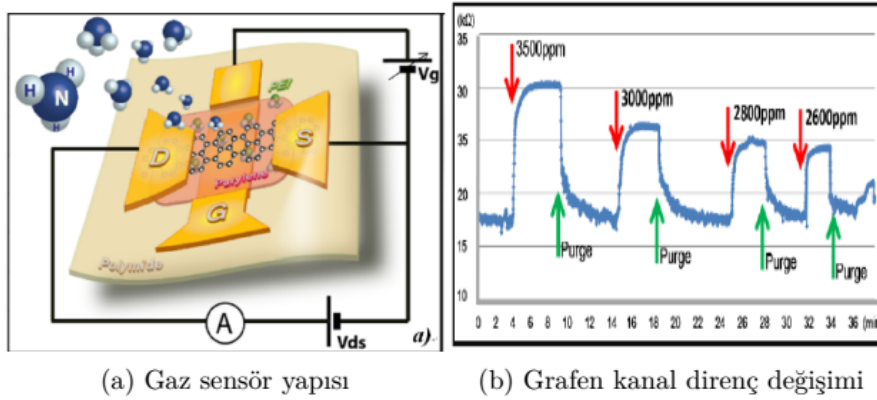
1.4. Bazı GFET Uygulamaları

Daha önceki bölümlerde GFET'in MOSFET'e göre kesim frekansı konusunda daha üstün olduğunu ayrıca lojik devrelerde de şimdilik MOSFET kadar verimli olmadığı anlatılmıştı. Yani GFET'in MOSFET gibi sadece bir transistör özelliğinden bahsedilmişti. Bu bölümde ise GFET'e özel olarak sadece GFET ile yapılabilecek uygulamaların birkaçından bahsedilecektir. GFET ile ilgili çalışmaların yakın zamanda arttığı ve bununla beraber GFET kullanılarak yapılan cihazlar için de aynı durum geçerlidir. Grafenin özgün özelliğinden dolayı özellikle GFET sensörler, rezonatörler

ve fotodetektörler ile ilgili araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir.

1.4.1. Gaz Sensörü

GFET'in en yaygın uygulamaları sensör uygulamalarıdır. Bunun en büyük sebebi ise grafenin tutucu bir özelliğe sahip olmasıdır. Şekil 1.17'de görülen GFET tasarımında kapı elektrodu alta yer almaktadır [26].

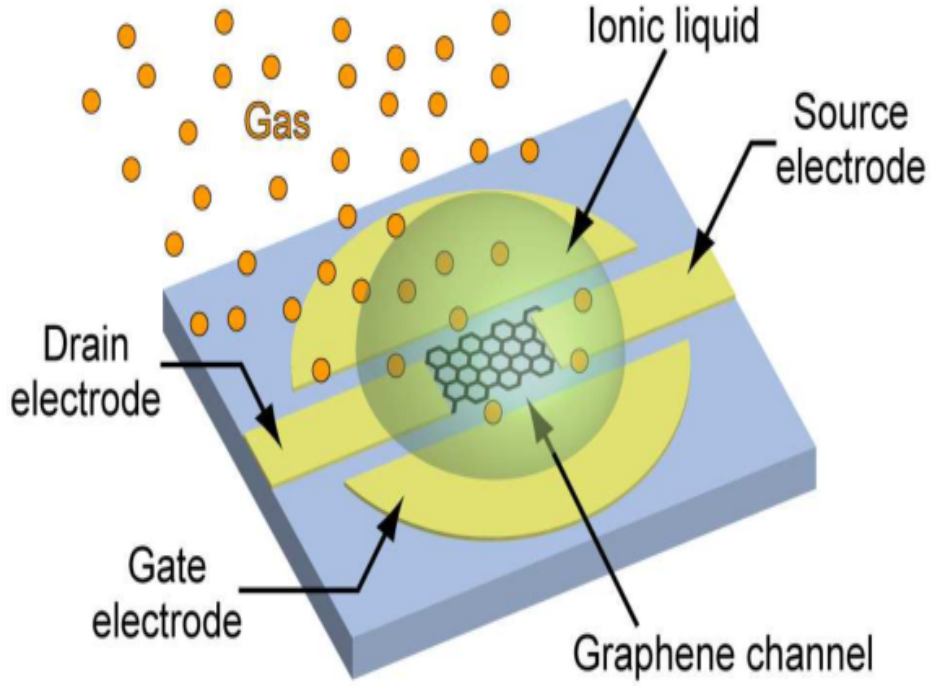


Şekil 1.17. GFET gaz sensörü [26]

Grafen kanal ile kapı elektrodunun arasına da parilen adı verilen yalıtkan konulmuştur. Grafenin üzerinde herhangi bir malzeme olmadığı için sensör uygulamalarına oldukça elverişli bir tasarımdır. Bu sensörün test edilmesinden önce dirac voltajının belirlenmesi gerekmektedir. Dirac voltajının belirlenmesinden sonra sabit bir kapı gerilimi ve sabit bir kaynak gerilimi ile transistör sensör olarak kullanılabilir. Grafen kanal ile kapı elektrodunun arasına da parilen adı verilen yalıtkan konulmuştur. Grafenin üzerinde herhangi bir malzeme olmadığı için sensör uygulamalarına oldukça elverişli bir tasarımdır. Bu sensörün test edilmesinden önce dirac voltajının belirlenmesi gerekmektedir. Dirac voltajının belirlenmesinden sonra sabit bir kapı gerilimi ve sabit bir kaynak gerilimi ile transistör sensör olarak kullanılabilir.

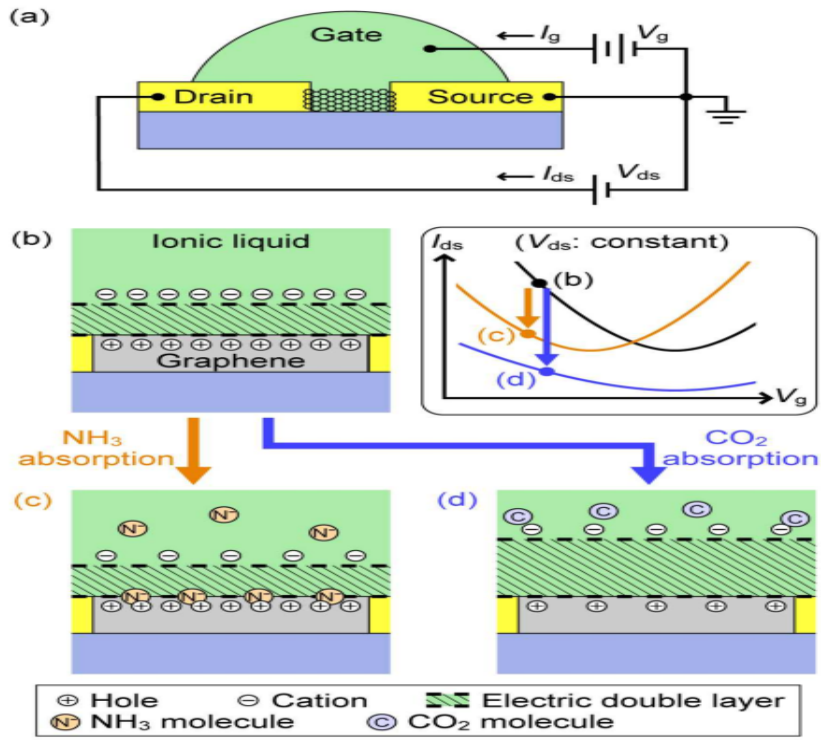
Bu tasarımda GFET üzerine farklı yoğunlukta amonyum gazı düşürülmüştür. Şekil 1.17'de görüldüğü gibi yoğunluk fazla olursa grafen ile etkileşim de fazla olacaktır. Grafenin iletim hızı azalacak yani direnci artacaktır. Her yeni süreçte tutulan gazlar temizlenmiş ve tekrar ölçüm alınmıştır. Grafenin direncine göre ortamdaki amonyum gazının tahmini yapılabilir.

Bir diğer gaz sensörü olarak da Şekil 1.18'de görülen GFET üzerine iyonik bir sıvı yerleştirilen bir sistemdir [27].



Şekil 1.18. İyonik sıvı ile GFET gaz sensörü [27]

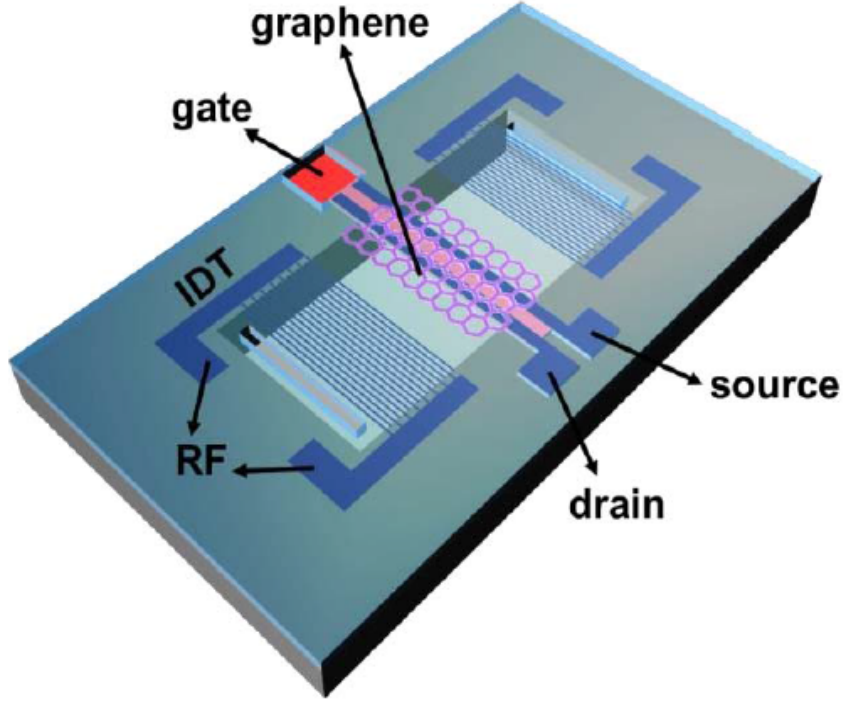
Daha önce de bahsedildiği gibi GFET'in karakterizasyonunda dirac voltajı değeri oldukça önemlidir. Bu dirac voltajı da grafenin yapısı, uygulanan kaynak gerilimi gibi birçok etkenden etkilenmektedir. Dirac geriliminden küçük kapı gerilimi uygulanan bölgede GFET p-tipi gibi davranmaktadır. Diğer bölgede ise n-tipi gibi davranmaktadır. Bu sistemde de uygulanan gazların GFET'teki taşıyıcı yoğunluğunu değiştirmesinden faydalanmıştır. Şekil 1.19'da görüldüğü üzere GFET üzerine uygulanan gazlar elektron iletimini yani n-tipi iletimi artırmaktadır. Bu da aynı zamanda p-tipi iletim için bir dezavantaj olacaktır. Bu da dirac voltajını n-tipi lehine değiştirecektir. Yani dirac voltajı sol tarafa yani p-tipi bölgesine ötelenecektir. Şekil 1.19' da gaz uygulanmadan ölçülen GFET'in dirac gerilim değeri en yüksekte çıkmıştır ve amonyak uygulanan GFET'in dirac gerilimi en küçük çıkmıştır [27].



Şekil 1.19. GFET gaz sensörünün dirac gerilimi kıyaslanması [27]

1.4.2. Rezonatör

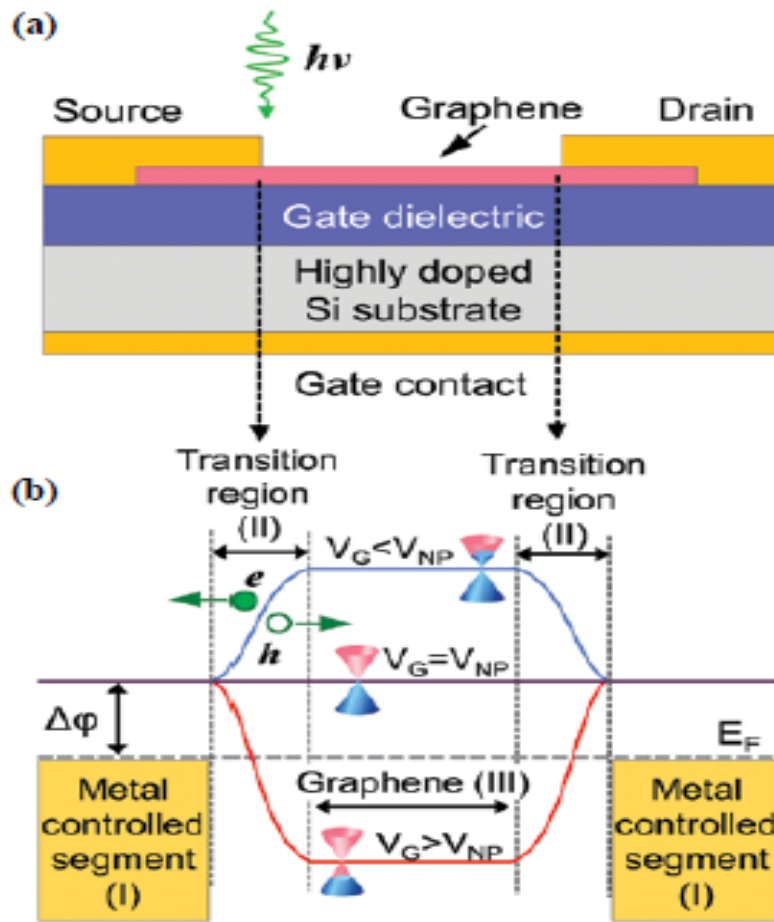
Şekil 1.20’de görülen ve grafen içeren elektronik cihaz bir RF MEMS rezonatör-dür [28]. Bu rezonatörde RF uygulayınca piezoelektrik etkisiyle akustik dalga üreten interdiijital transduser (IDT) vardır. Bu üretilen dalga ikinci portta algılanmaktadır. Bu iki port arasında da bir GFET bulunmaktadır. Kapı elektrodu alt kısımda bulunmaktadır ve yalıtkan olarak alüminyum nitrit kullanılmıştır. Bu alüminyum nitrit ayrıca piezoelektrik katman olarak da görev yapmaktadır. Bu üretilen akustik dalga birinci porttan grafen üzerinden ikinci porta geçerken grafen kanal akustik-elektrik etkisiyle bir elektrik akımı oluşturmaktadır.



Şekil 1.20. RF MEMS rezonatör [28]

1.4.3. Fotodetektör

Yarı iletkenler bant aralıkları doğrultusunda sınırlı sayıda fotonu absorbe edebilirler. Grafende bant aralığı yoktur bu yüzden görünür ışıktan kızılötesine kadar geniş bir spektrumda absorbe edebilmektedir. Ancak uyarılan grafende uyarılan elektronun ömrü kısadır ve bu yüzden akım oluşmaz. Diğer taraftan metallere oluşturulan elektrik akımını çok iyi ileteneğinden çok hızlı ve yüksek frekansta bir detektör elde edebiliriz. Şekil 1.21’de bir GFET fotodetektör ve bu yapının çalışmasının zaman skalası görünmektedir [29]. Gelen ışık absorbe edildikten sonra uyarılan elektronlar grafen kanalından diğer elektroda bir akım oluşturmaktadır.



Şekil 1.21. GFET fotodetektör [29]

2. TASARIM

Bu çalışmanın sonraki çalışmalara temel oluşturabilmesi için GFET tasarımında grafen kanalın üstte kalacağı ve üretim basamaklarının minimum olacağı bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Grafenin en üstte olduğu bu tasarımın sensör olarak kullanımı da mümkündür. Ayrıca ölçüm alınacak bacaklar olabildiğince büyük yapılmıştır bunun sebebi de karakterizasyonu kolaylaştırmaktır. Bu tasarım yapılırken hangi malzemelerin kullanılacağına karar vermek çok önemlidir. Çünkü bir metali aşındıran karışımın daha önce üretilen metalleri aşındırmaması gerekir. Ayrıca yalıtkan sürecinden kurtulmak için kapı elektrodu olarak alüminyumun seçilmesi de önemli bir avantajdır.

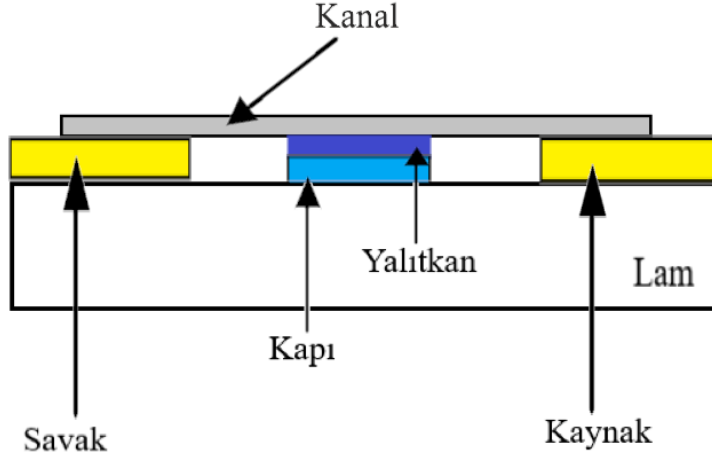
2.1. GFET Tasarımı

FET daha önce de bahsedildiği gibi savak, kaynak ve kapı olmak üzere üç elektrodu olan ve savak-kaynak arasında kanal olan bir elektronik elemandır. Ayrıca kapı elektrodunun kanaldan yalıtılması gerekmektedir. GFET'in tek ve en büyük farkı kanalda iletkenliği sağlamak amacıyla elektrik iletkenliği yüksek olan grafenin kullanılmasıdır. Önceki başlıkta 3 farklı GFET yapısından bahsedilmişti. Bunların birbirlerinden farkı da kapı elektrotlarının konumlandırılmasından gelmekteydi.

Bu tez çalışmasında tasarlanan GFET kapı elektrodu yukarıda olana benzemektedir ancak aynı zamanda grafenin en üstte kalmasından dolayı da özgün bir tasarımdır. Kanalın üstte konumlandırılmasının amacı da metal elektrotların üretim sürecini hızlandırmak ve metal elektrotların üretim optimizasyonunu yaparken grafene zarar vermemek amacıyla grafen kanalın en son eklenmesi planlandı. Ayrıca grafenin üstte kaldığı bir yapı sensör olarak kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. Metal elektrotların seçiminde bir kısıt yoktur ancak grafen ile metalin kontağında oluşacak direnç çok transistörü etkileyeceğinden metal elektrotların seçimi de çok önemlidir. Kapı elektrodu olarak alüminyum seçildi. Bunun nedeni de alüminyumun

oksitlenerek kendi kendine yalıtkan malzeme oluşturması ve yalıtkan oluşturmasıdır.

Şekil 2.1’de tasarlanan GFET yapısı görünmektedir.



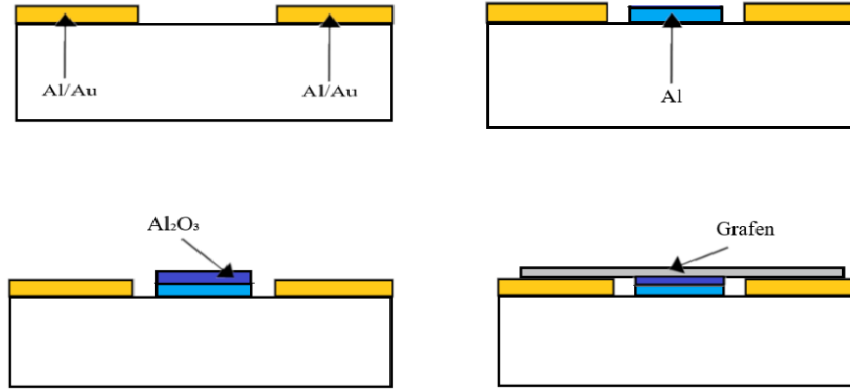
Şekil 2.1. Tasarlanan GFET yapısı

2.2. GFET Üretim Planlama

GFET üretimi kısaca FET üretimi ve grafen transferi olarak ikiye ayrılmaktadır. FET üretimi ise savak-kaynak elektrotları ile bunlar arasındaki kanaldan yalıtılmış bir kapı elektrodundan oluşmaktadır. Daha önce de bahsedildiği üzere öncelikle FET üretilip sonrasında kanal olarak grafeni transfer etmek en elverişli yoldur. Çünkü metal elektrotların üretim optimizasyonu sürecine bir de grafen transferi ve aşındırması eklememek süreçte hız kazandıracaktır. Bu sebepten dolayı öncelikle kaynak-savak elektrotları üretilmesi planlandı sonrasında bu iki elektrodun arasına başka bir üretim süreciyle kapı elektrodu eklenmesi planlandı. Kapı elektrodu olarak alüminyum kullanılması planlandı. Kapı elektrodu üzerine yalıtkan eklenip yalıtkanın üzerine de grafen kanalın transferi ile GFET üretiminin tamamlanması planlandı. Alttaş olarak da mikroskop lamı tercih edilmiştir.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi lam üzerine öncelikle alüminyum ve altın kaplanır. Burada alüminyum altının lama yapışması için yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır.

Altın ise kaynak ve savak elektrotlarını oluşturmaktadır. İkinci aşama olarak iki elektrot arasına alüminyum kapı elektrodu olarak kaplanır. Daha sonra alüminyum açık havada bekletilir ve üzerinde alüminyum oksit oluşur. Bu alüminyum oksit kapı elektrodunun kanaldan yalıtılması görevini görmektedir. Daha sonrasında ise grafen kanal olarak transfer edilir ve transistör üretimi gerçekleştirilmiş olur.

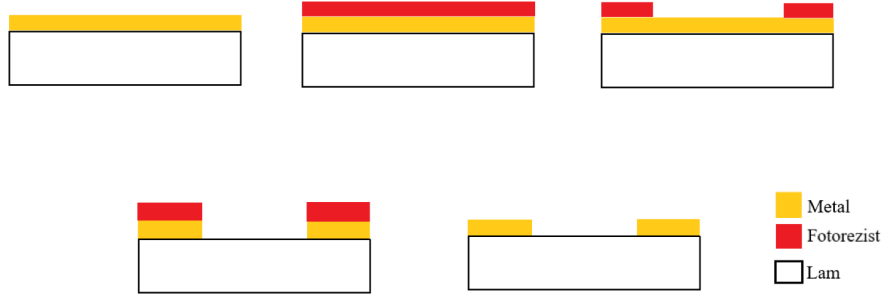


Şekil 2.2. GFET üretim aşamaları

2.2.1. Metal

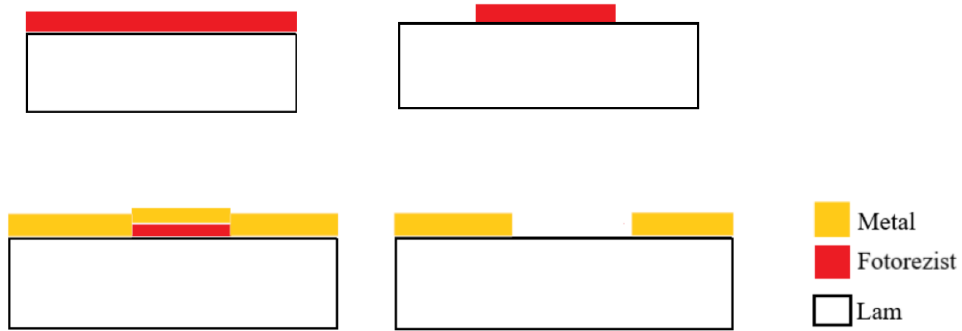
GFET üretiminde ilk yapılacak işlem metal elektrotların oluşturulmasıdır. Burada iki önemli husus vardır. Birincisi seçilecek metalin hangi element olması gerektiğidir. Diğeri ise seçilecek metale göre üretim yönteminin belirlenmesidir. Bunun sebebi de bazı metaller aşınabilmektedir ancak bazılarını aşındırmak oldukça zordur. Şekil 2.3'te görülen şekilde en alttaki beyaz pulu, sarı renk kaplanan metali ve kırmızı renk ise fotorezisti göstermektedir. Öncelikle boş pul istenilen metal kaplanır. Sonrasında litografi yapılır ve pulda kalmasını istediğimiz metal kısımlarının üzeri fotorezist kaplanır. Sonrasında örnek metal aşındırıcıya atılır ve fotorezistin altında kalan kısım hariç aşınır. Daha sonrasında ise fotorezist temizlenir ve istediğimiz metal elektrotları elde etmiş olunur.

Aşınması zor olan gümüş ve nikel gibi metaller için lift-off ismi verilen



Şekil 2.3. Aşındırma yöntemiyle metal elektrotların üretimi

yöntem kullanılır. Bu yöntemde pul öncelikle fotorezist kaplanır sonrasında litografi yapılır. Ancak litografi önceki yöntemin tam tersi bir maske ile yapılır. Önceki süreçte istenilen kısımlara fotorezist serilirken burada istenilmeyen kısımlarda fotorezist olur istenilen yerler boş olur. Daha sonrasında fotorezistin üzerine metal kaplanır. Bu sürecin en kritik adımı lift-off yapılır. Lift-off yöntemi Şekil 2.4'te görüldüğü üzere altta kalan fotorezistin üstündeki metal ile birlikte kaldırılmasıdır. Fotorezist olan yerlerin üzerindeki metaller fotorezistle beraber kaldırılınca istenilen metaller örnekte kalmış olur. Lift-off yöntemiyle fotorezistin kaldırılması için aseton ile beraber ultrasonik karıştırıcıda titreştirilmesi gerekir.



Şekil 2.4. Lift-off yöntemiyle metal elektrotların üretimi

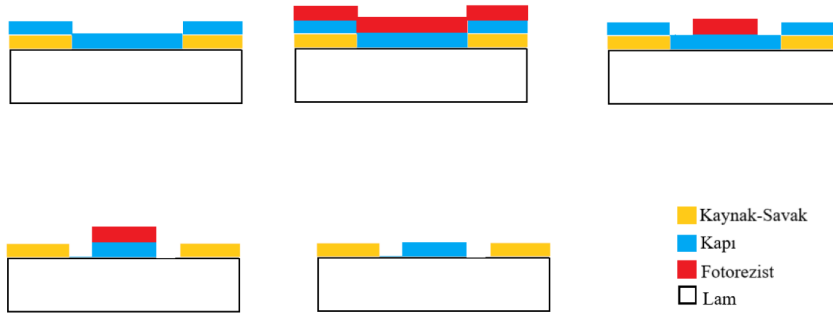
Metal elektrotların seçiminde çok önemli iki husus vardır. Bunlardan birincisi kullanılacak metalin aşındırma veya lift-off süreçlerinin kolay olmasıdır. Diğer husus

ise kullanılacak metal ile grafenin kontakta yüksek bir direnç oluşmamasıdır.

2.2.2. Yalıtkan

GFET tasarımında bahsedildiği üzere kapı elektrodunun kanaldan yalıtılması gerekmektedir. Kanal, savak ve kaynak elektrotlarını kısa devre etmektedir. Eğer kapı elektrodu da kanal ile kısa devre olursa transistörün çalışması mümkün olmamaktadır. GFET, kapı elektrodunun konumuna göre isimlendirilmektedir.

Bu tasarımda bir yalıtkan malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere iki metal elektrot arasına kapı elektrodu eklenmektedir. Bu şekilde sarı renk daha önce üretilen metali mavi renk ise kapı elektrodu olarak üretilen alüminyum temsil etmektedir. Kırmızı ise daha önceki süreçteki gibi fotorezisti göstermektedir.



Şekil 2.5. Kapı elektrodunun üretilmesi

Bu tasarımda ilk aşamada kapı elektrodu olarak alüminyum seçilmiştir. Alüminyum aşındırmak kolay olduğu için lift-off sürecine gerek kalmamıştır. Alüminyum seçilmesinin sebebi de alüminyum açıkta 6 saat kadar bekletilirse üzerinde 20-30 nanometre kadar AL_2O_3 oluşur [30]. Alüminyumun bu oksitlenme özelliği kapı elektrodunun kanaldan yalıtılması için yeterli olmaktadır. Burada bir diğer önemli parametre ise alüminyum aşındırırken ilk başta yapılan savak kaynak elektrotlarının aşınmaması gerekmektedir. Ayrıca bir diğer önemli konu da

hizalamanın hassas yapılmasıdır. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere iki elektrodun arasına gelmektedir ve aynı pulda birçok GFET olduğu için bütün hepsinin hizalamasının hassas şekilde yapılması gerekmektedir.

Ayrıca bu tasarımda alüminyumun yeterince oksitlenip yalıtkan oluşturamama ihtimaline karşı kapı üretimi için kullanılan maske ile kapı elektrodu üzerine yalıtkan malzeme kaplanması mümkündür. Bunun için sadece fazladan yalıtkan kaplama işlemi gerekmektedir. Bu planlama yapılırken bu iki seçenek de göz önünde bulundurularak tasarım gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Kanal

GFET üretiminin en önemli ve fark yaratan kısmı kanal yani grafen transferidir. Üretimdeki en son aşama grafen transferidir. Bu bölümde grafenin üretimi ve transferi sürecinde üniversitemizin Fizik Bölümü araştırmacılarından destek alındı. Laboratuvarında bulunan CVD cihazıyla bakır üzerinde grafen üretilmektedir. Şekil 2.6'de görüldüğü üzere bakırın iki yüzünde de grafen bulunmaktadır. Burada sarı renk bakır gri renk ise grafeni temsil etmektedir. Kırmızı renk ise fotorezisti göstermektedir. Grafeni transfer etmek için öncelikle bakırın üzerine fotorezist serilir. Daha sonrasında bakır aşındırılır. Bakır aşındırıcı ile bakırın altında bulunan grafen tabakası da aşınır. Fotorezist ve altında grafen tabakası kalır. Daha sonrasında bu şekilde transistörün üzerine transfer edilir ve 80 dereceye kadar ısıtılır. Burada önemli bir nokta grafenin kapı elektrodunun üzerine taşmasını ve dolayısıyla kısa devre oluşturmasını engellemektir. Transfer edilen fotorezist ve grafen ısınınca lama yani transistöre yapışır. Yapışma gözlemlendikten sonra soğutulur ve aseton ile fotorezist temizlenir.



Şekil 2.6. Grafen transferi

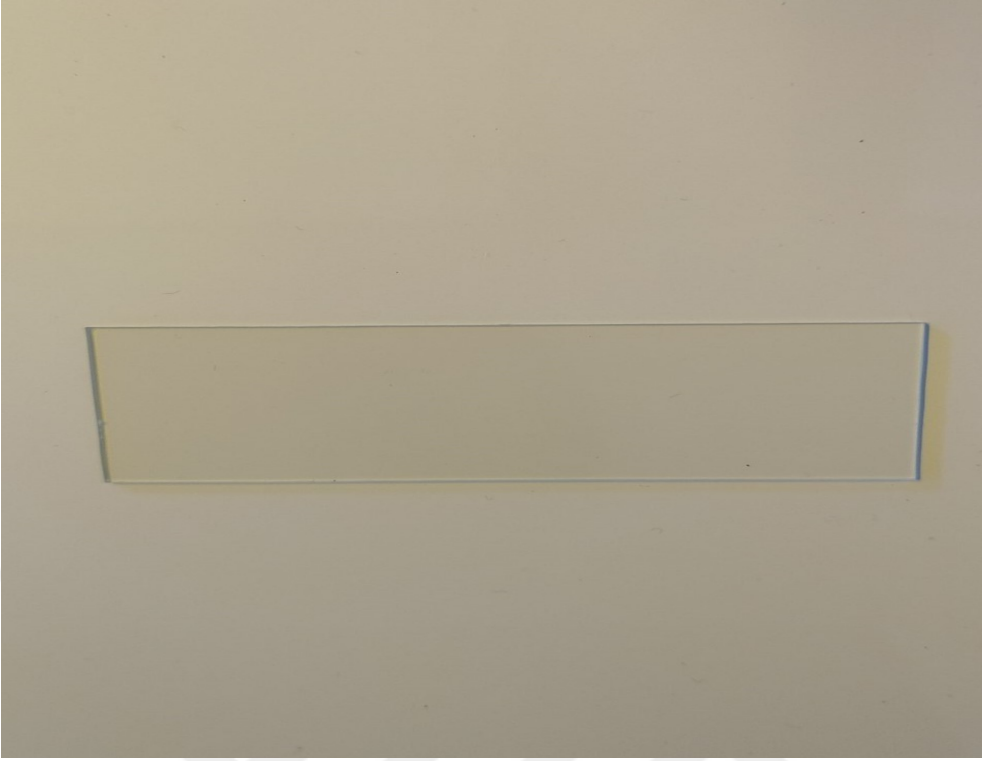
2.3. Maske Tasarımı

Maske tasarımını Klayout programında yapıldı. Pul maliyetinin yüksekliğinden dolayı üretim Şekil 2.7’de görülen kalınlığı 1 mm ve 26 mm genişliğinde 76 mm uzunluğunda olan mikroskop lamında yapılacağından dolayı maske tasarımı da bu lam boyutlarına göre yapıldı.

Hassas boyutlarda maskenin üretiminin maliyeti yüksek olduğu için öncelikle hizalama cihazının yuvasına uygun şekilde cam kestirildi. Sonrasında bu cam bakır kaplandı. Selçuk Üniversitesi Fizik Bölümü’nde lazer cihazıyla maske test yapılarının oluşturulması denendi. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere test yapıları lazer ile kazınarak kaldırıldı. Ancak bu cihazın hassasiyeti 70 mikrometre boyutunda olduğu için asetat kağıda alınacak hassas bir baskı da 80 mikrometre olduğundan maske üretiminde asetat kağıda alınan baskı tercih edildi.

Boyutları yukarıda verilen lama 12 tane GFET sığacak şekilde tasarım yapıldı. Maskenin asetat kağıdındaki görüntüsü Şekil 2.9’da gözükmemektedir. En alttaki savak-kaynak elektrotları ve test bacakları, ortadaki kapı elektrodu ve en üstteki de grafen yani kanal elektrodunun maskesidir.

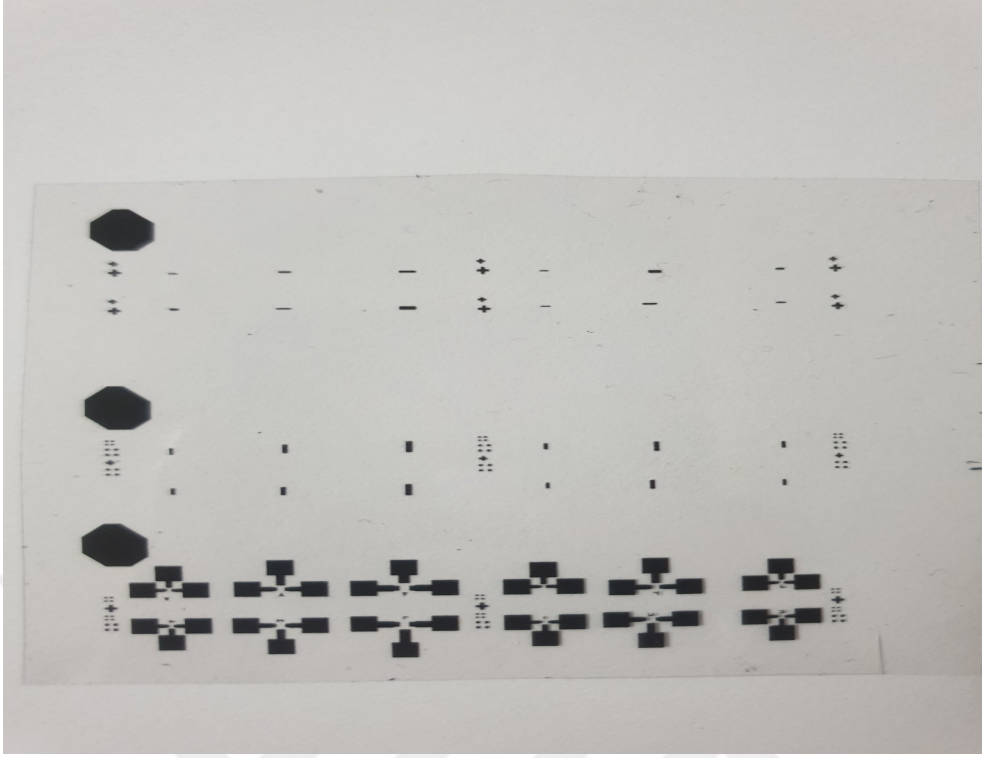
Şekil 2.10’da bir tane GFET’in üstten görünümü gözükmemektedir. En altta kırmızı renkteki katman kaynak-savak elektrot katmanıdır. Ortada yeşil renkte olan



Şekil 2.7. GFET üretiminin yapıldığı lam



Şekil 2.8. Bakırın lazerle kazınarak oluşturulan maske test yapıları

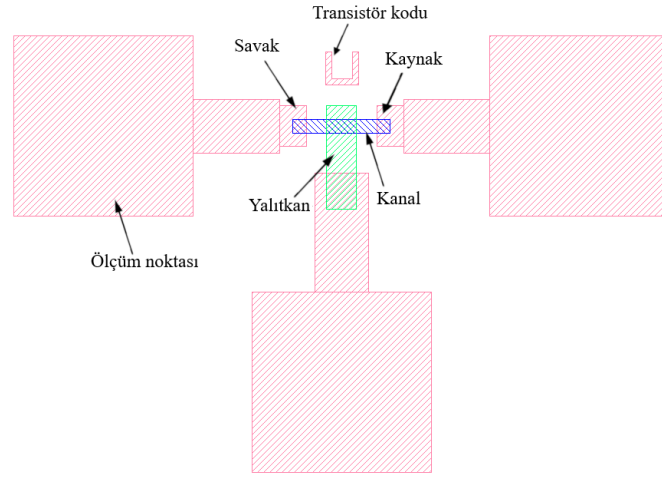


Şekil 2.9. Asetat kağıda bastırılmış maske

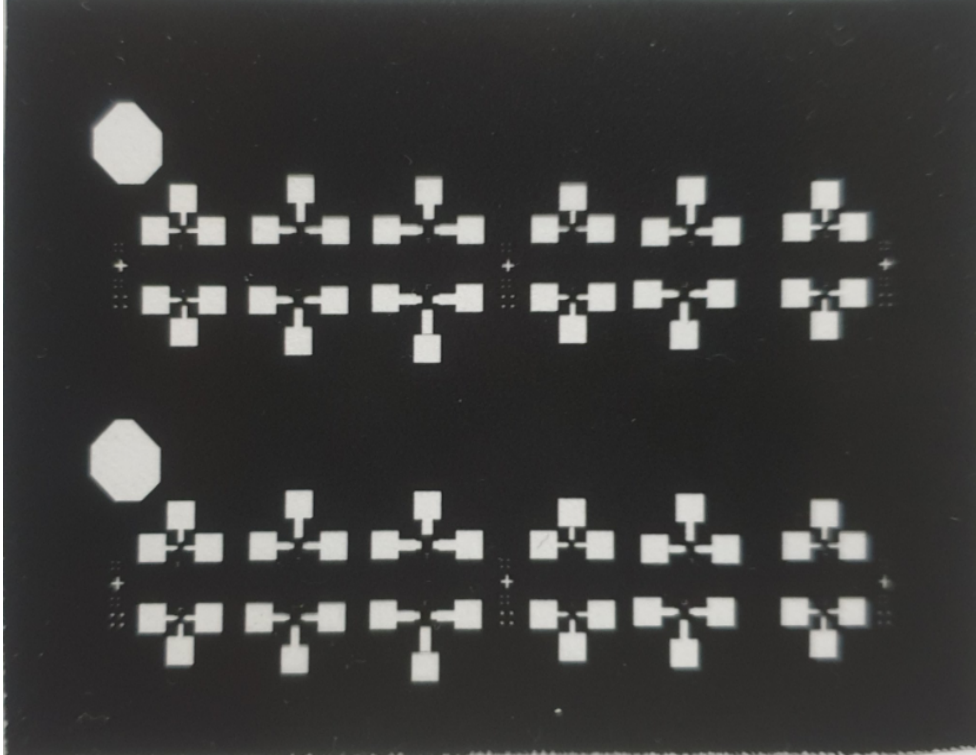
kapı elektrodu en üstte mavi renkte olan ise kanal yani grafendir. Ortadaki işaret de transistörleri birbirinden ayırt edebilmek için konulmuştur. Büyük kare şekiller ise ölçüm ve test için bağlantı noktalarıdır.

Bu süreç için üç maskeye gereksinim vardır. Ayrıca metal için lift-off yapılabilmesi için de Şekil 2.11' de görülen maske kullanılmaktadır. Sadece ilk katman için birinci maske değişebilir 2. ve 3. adım iki durumda da aynıdır. Şekil 2.9'da gözüken 12 tane GFET tasarımının hepsi birbirinden farklı boyutlardadır. Şekil 2.9'da gözüken maskede yukarıdaki GFET'ler soldan sağa 1-6 arası numaralandırılmış ve alttakiler de 7-12 arası numaralandırılmıştır. Bu numaralandırmaya göre maskelerin boyutlarıyla ilgili detaylar aşağıdaki Tablo 2.1'de görülmektedir. Tabloda gözüken boyutlar mikrometre boyutundadır.

Ayrıca Şekil 2.12'de baskı kalitesinin testi amaçlı yapılar, ikinci ve üçüncü aşamada hizalama için gerekli olan şekiller gözükmektedir. Bütün transistörlerin kapı elektrotlarının tam ortada olabilmesi için bu şekillerin birbiriyle eşleşmesi gerekmektedir. Bu da hizalamada kolaylık sağlamaktadır.



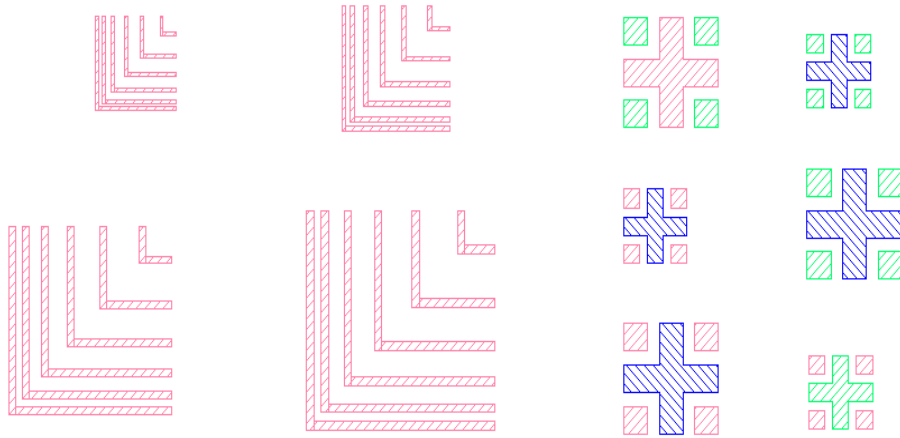
Şekil 2.10. GFET maskenin üstten görünümü



Şekil 2.11. Lift-off yöntemi için kullanılan maske

Tablo 2.1. GFET Boyutları

GFET Numaraları	Kapı Kaynak Savak Uzaklığı	Kapı Kalınlığı	Grafen Kalınlığı
1	100	220	100
2	150	330	150
3	200	440	200
4	100	220	50
5	150	330	300
6	100	220	200
7	80	220	200
8	225	330	100
9	150	440	400
10	150	150	50
11	225	300	150
12	150	200	100



(a)

(b)

Şekil 2.12. a) Maske test yapıları b) Hizalama yapıları

3. ÜRETİM VE SONUÇ

Bu bölümde maliyeti düşük tutmak için öncelikle düşük maliyetli ancak istenilen sonucun alınmadığı elektrot üretimleri ve maliyeti yüksek ancak başarılı elektrot üretimi anlatılmıştır. Daha sonrasında ikinci kısım yani kapı elektrodunun üretilmesi anlatıldı ve grafen kanalın transfer kısmı anlatılmıştır. Ayrıca bu üretim süreçlerinde uygulanan litografi optimizasyonu, son olarak da elde edilen GFET'in karakterizasyonu anlatılmıştır.

3.1. Üretim Akışı

Üretim kısmında çalışmanın büyük çoğunluğunu metal üretim optimizasyonu oluşturmuştur. Metal elektrotların üretimi için birçok malzeme denenmiş. Bunların birçoğu laboratuvarımızda bulunan Şekil 3.1'deki termal kaplama ile yapılmıştır. Ayrıca bunun yanında Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde ve Selçuk Üniversitesi Fizik Laboratuvarındaki Pulsed Laser Deposition (PLD) isimli cihazla da kaplama yapılmıştır.

3.1.1. Savak-Kaynak Elektrotları

MEMS dünyasında metal elektrotlar için titanyum/krom/palladyum üzerine altın en yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak çalışmaya maliyeti düşük olandan başlamak bizim için tekrar edilebilirliği açısından bir avantaj olacaktır. Bu yüzden bu elektrotların üretimi için ilk olarak gümüş metali denendi. Gümüşün bilinen en iyi iletken metal olmasının yanında altından ucuz olması üretimin tekrarlanabilmesi açısından bir avantaj oldu. Ancak bu avantajla birlikte gümüş elektrot üretiminde iki büyük sorunla karşılaşıldı. Bir tanesi gümüşü aşındırmak çok zor olduğu için daha önce de bahsedilen lift-off prosesi uygulandı. Bu süreçte bir diğer sorun olan

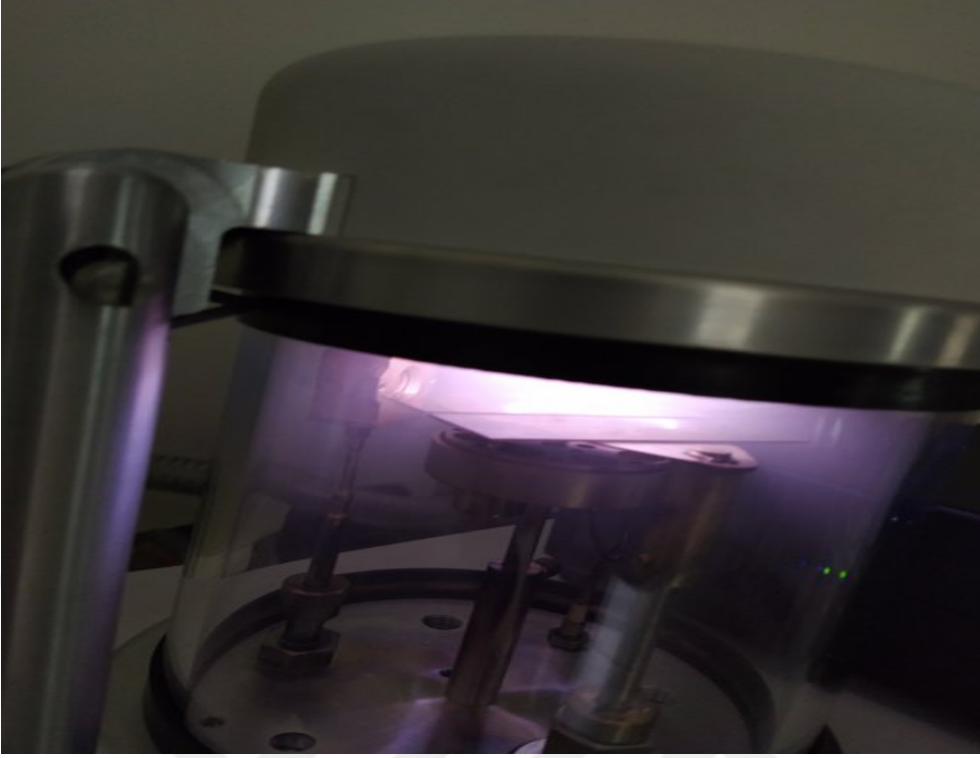


Şekil 3.1. Termal kaplama cihazı

gümüşün cama yapışmama problemi ortaya çıktı. Bunun için de önce ince film şeklinde alüminyum onun üzerinde de gümüş kaplama denendi. Ancak alüminyuma gümüşün yapışması istenilen derecede olmadı ve lift-off yaparken gümüş de alüminyumdan aşındı ve sadece alüminyum kaldı. Bu problemi aşmak için termal kaplama yaparken gümüş kaplamadan önce cam 50-60-70-80-90 derecelere ısıtıldı. Bu denemelerin hepsinde istenilen sonuç alınamadı. 100 derecenin üzerine çıkmak fotoreziste zarar vereceğinden daha fazla ilerleme yapılamadı.

Alüminyum üzerine gümüş olmayınca BİTAM'da altın palladyum karışımı Şekil 3.2'de gözüken cihazda yapıldı. Bu cihazda titanyum üzerine altın olarak değil de bir karışım şeklinde kaplama yapılmaktadır. Altın kaplandıktan sonra litografi işlemleri yapıldı ve istenilen elemanlar kaldı diğer kısımlar aşındı. Ancak ikinci aşamada yani kapı elektrodu olarak alüminyum kaplanıp aşındırırken bu altınlar da alüminyumla beraber aşındı. Burada yine altının cama yapışmama durumu bu probleme sebep oldu.

Bu denemede de istenilen sonuç alınamayınca Selçuk Üniversitesi Fizik Bölümü'nde PLD ile saf altın kaplandı. Yine önceki durumda olduğu gibi bu süreç de



Şekil 3.2. BİTAM’da altın-palladyum kaplama

ikinci kısımda yani alüminyum aşındırmada altının aşınmasıyla başarısız oldu.

Bir diğer deneme olarak krom üzerine gümüş kaplama denendi. Gümüşün üretim yöntemi lift-off olduğu için kaplamadan önce fotorezist kaplandı ve litografi yapıldı. Sonrasında krom ve gümüş laboratuvarımızda bulunan termal kaplama cihazı ile kaplandı. Kromun erime sıcaklığı 1907 derece olduğu için kromu kaplamak için çok fazla enerji vermek gerekti ve bu da ortamın dolayısıyla camın ısınmasına sebep oldu. Krom ve gümüş kaplandı ancak yüksek sıcaklıkta fotorezistin yapısı bozulduğundan lift-off sürecinde gümüş ve krom aşınmadı.

Krom ile lift-off olmayacağı anlaşıldığından krom üzerine altın kaplayıp hem altını hem de kromu aşındırma denendi. Altın maliyetinden kaçınmak adına öncelikle sadece krom kaplayıp kromu aşındırma denendi ancak kromu aşındırma gerçekleşmedi. Kromu aşındırmak için literatürde olan birkaç yöntem denendi. Literatürde en yaygın olan yöntem serik amonyum nitrat ile aşındırma yöntemidir. Ancak bu kimyasal temin etmek mümkün olmadı. Bu kimyasalın ithalatı gerektiğinden ve salgın sebebiyle bu kimyasalın ithalatı uzun süreceğinden literatürde yer alan başka yöntemler denendi. Öncelikle aqua regia ismi verilen 3 birim HCL 1

birim HNO_3 karışımında 15 dakika bekletildi ancak bir değişim gözlenmedi. Ayrıca hidroflorik asitin yüzde 2 derişiminde bekletildi bundan da sonuç alınamadı. Daha sonrasında Hidrojen peroksit ile hikroklorik asitin 1/3 oranında karışımında bekletildi ancak bu da etki etmedi. Daha sonrasında ise hidroklorik asit ile saf suyun 1/1 oranında karışımı 50 dereceye ısıtıldı ve alüminyum ile elektrot yapıldı. Bunun sebebi kromun üzerinde oluşan oksitlenmeyi kırmaktı. Bu yöntem de etki etmedi. Bu denemelerden sonra anlaşıldı ki kromun üzerindeki oksiti öncelikle kaldırmak sonrasında aşındırmak gerekiyordu. Bunun için de serik amonyum nitrat gerekiyordu fakat yukarıdaki sebeplerden ötürü bu kimyasal da temin edilemedi.

Kromu aşındıramayınca 24 ayar 995/1000 saflıkta altın ile metal elektrotların üretimi planlandı ve alüminyum üzerine altın kaplayıp altının aşındırılması denendi. İlk başta yine yapışmama problemi ile karşılaşıldı ancak termal kaplama cihazının içinde alüminyum kapladıktan sonra lam 300 dereceye kadar ısıtıldı sonrasında ise altını kapladıktan sonra 500 dereceye kadar ısıtıp burada bir saat kadar bekletildi. Daha sonrasında yüzde 20 derişimde 3 birim HCL 1 birim HNO_3 karışımında yaklaşık dakika bekletilerek altın ve alüminyum aşındırıldı. Şekil 3.3'de görüldüğü üzere herhangi bir deformasyon olmadı.

Bu süreçten edinilen bilgiye göre Selçuk Üniversite'sinde ve BİTAM'da altın kaplanan örnekler 500 dereceye kadar ısıtılsaydı istenilen sonuç elde edilebilirdi. Ancak termal kaplama ile sonuç alındığından tekrardan önceki denemeleri denemeye gerek kalmadı.

3.1.2. Kapı Elektrodu

Kapı elektrodu olarak alüminyum seçildi çünkü oksitlenme oranı yüksek olduğundan ve alüminyum oksidin yalıtkan görevi görebilmesinden dolayı alüminyum seçildi. Kapı elektrodunun alüminyum olduğu belli olduğu için ve alüminyum aşındırırken kaynak savak elektrotlarının aşınmaması için kaynak savak elektrotları seçimi çok önemli ve kritik oldu. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere savak ve kaynak elektrotları arasına alüminyum kapı elektrodu kaplanmıştır. Sadece elektrot kısmı alüminyumdur transistör için ölçüm alınacak olan ve bu yüzden büyük yapılan bacaklar kapı elektrodu için de altın yapılmıştır. Burada kapı elektrodunda altın

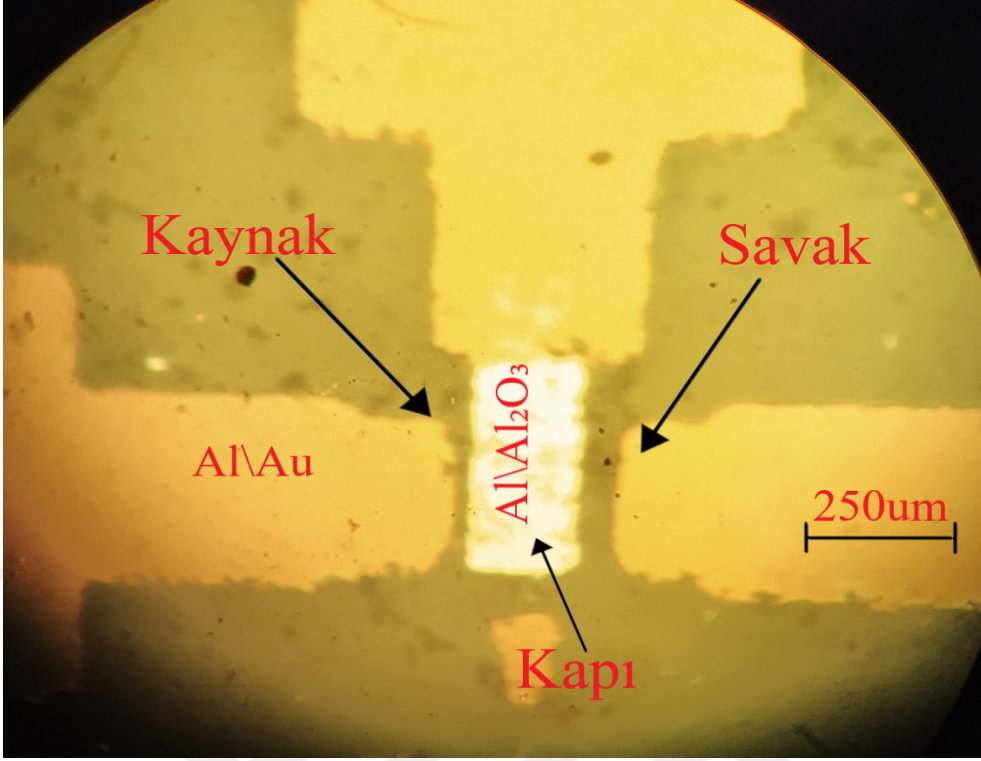


Şekil 3.3. Altın ve alüminyum aşındırılmış örnek

üzerine alüminyum olacak şekilde kontak kurulmuştur. Kapı elektrodunun da başarıyla kaplanmasından sonra transistör açık alanda oksitlenmesi için bekletildi.

3.1.3. Grafen Kanalı

Laboratuvarımızda bulunan Şekil 3.5'te görülen CVD cihazı ile üretilen grafenin transistörün üzerine kanal olacak şekilde yerleştirme işlemidir. İlk olarak CVD cihazında bakır üzerine grafen üretilir. Sonrasında üzerine fotorezist serilir ve bakır aşındırıcıya atılır. Bakır aşındırıcıda bakır aşındıktan sonra grafen ve fotorezist kalır. Sonrasında GFET'in üzerine bu şekilde transfer yapılır. Transfer yapıldıktan sonra 80 derecede ısıtılır ki grafen GFET üzerine yapışsın. Daha sonrasında fotorezist kaldırılır ve grafen transfer edilmiş olur.



Şekil 3.4. Üretilmiş elektrotların mikroskop görüntüsü



Şekil 3.5. CVD cihazı

3.2. Litografi Optimizasyonu

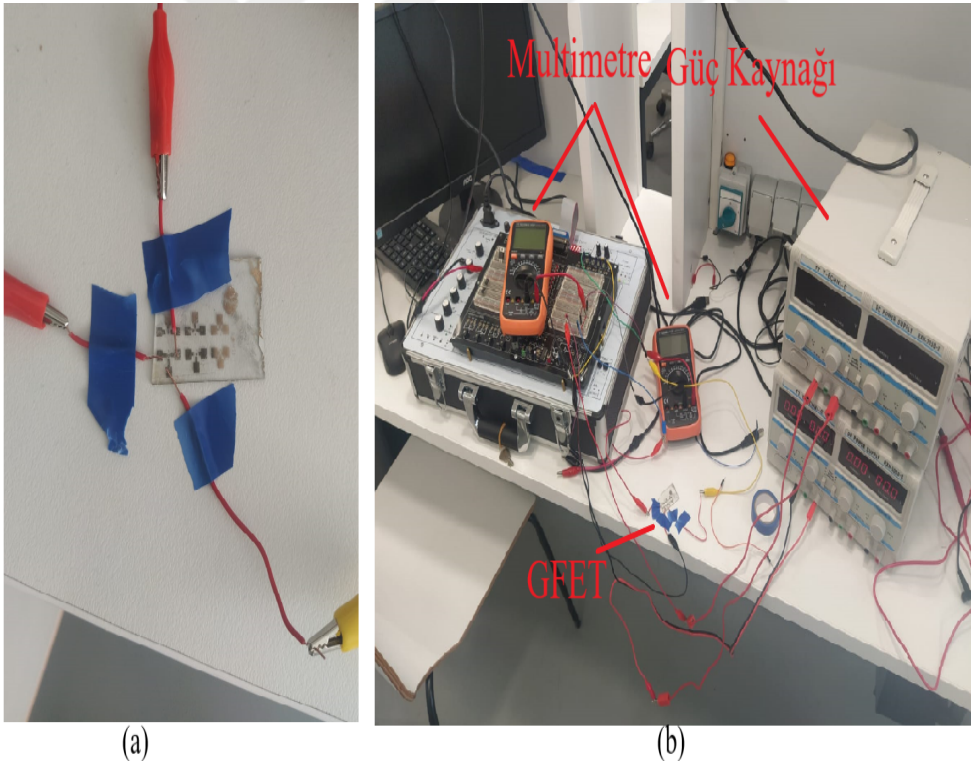
Öncelikle lamalar aseton ve izopropil alkol ile temizlendikten sonra en az 10 dakika boyunca 150 derecede dehidrasyon işlemine sokulur. Bunun sebebi herhangi bir su veya başka bir molekül varsa bunları buharlaştırarak camı fotorezist veya metal kaplamaya hazır hale getirmektir. Sonrasında camın üzerine fotorezist dökerek döner kaplama işlemi uygulandı. Burada fotorezist olarak S1813 fotorezisti kullanıldı. Bu işlemde öncelikle 10 saniye boyunca 500 devir/dakika hızla dönüp fotorezistin tüm cama yayılmasını sağlamak sonrasında ise 30 saniye boyunca 3600 devir/dakika hızında dönerek fotorezistin ince bir tabaka olarak kalması sağlandı. Bu işlemden sonra örnek 113 derecede bir dakika boyunca ısıtıldı. Bu işlem fotorezistin örneğe yapışmasını sağlamaktadır Daha sonrasında ise pozlama işlemi yapıldı. Pozlama işlemi ise fotorezist serilen örneğin üzerine maskeyi koyarak ultraviyole ışıktaki 12 saniye kadar bekletmektir. Bu işlemde eğer aşındırma yöntemi kullanılacaksa kalması istenilen yerlerde fotorezist olur diğer yerler aşınır. Eğer lift-off yöntemi uygulanacaksa istenilen yerler boş kalır diğer kısımlarda fotorezist olur. Pozlanan lam 1.5 gr $NaOH$ 500 ml saf su karışımında hafifçe titrelir. Pozlama işlemi Şekil 3.6'da gözüken ve aynı zamanda hizalama işleminin de yapıldığı cihazla yapıldı.



Şekil 3.6. Pozlama ve hizalama cihazı

3.3. GFET Karakterizasyonu

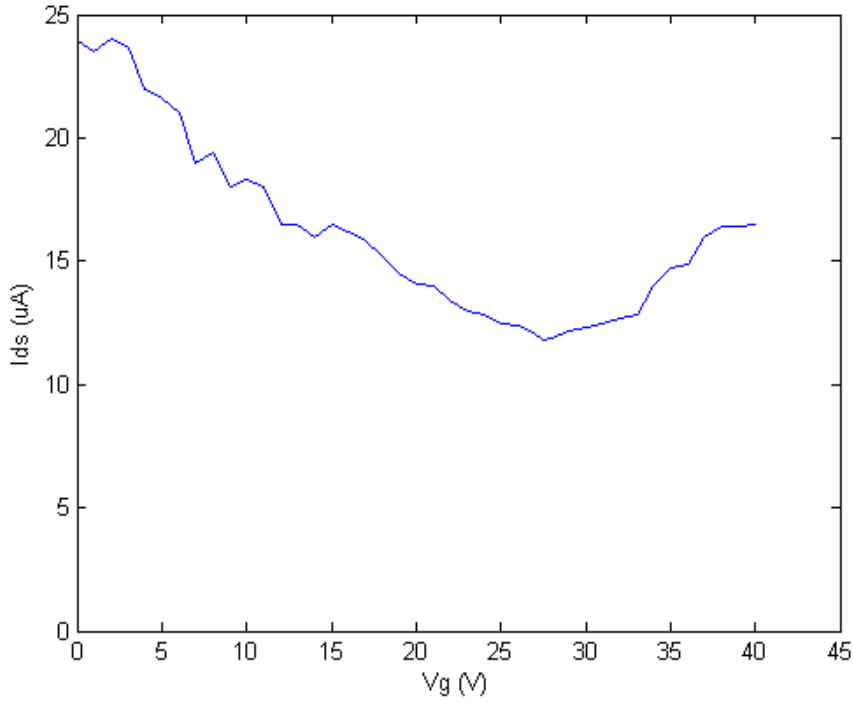
Grafenin başarıyla transferinden sonra transistörlerin karakterizasyonu gereklidir. Bu karakterizasyon işleminde transistörün çalışıp çalışmadığı veya ne kadar verimli çalışıp çalışmadığı öğrenilir. Transistör karakterizasyonunun en bilinen yöntemi akım ve gerilim grafiği çıkarmaktır. Kapı bacağına uygulanan gerilim ile kaynak-savak bacaklarından akan akımın grafiği bize transistör hakkında bilgi verir. Bilinen transistörlerde eşik gerilimi adında bir gerilim değeri vardır. Bu değeri aştıktan sonra transistörden akım akmaya başlar ancak GFET’lerde durum farklıdır. Kanal her daim açık olduğu için kapı bacağına gerilim uygulamadan bile akım değeri gözükür. Bu akımın sebebi karakterizasyon için gerekli olan kaynak bacağına uygulanan sabit gerilimdir. Şekil 3.7’de üretilen grafen transistörün test sistemi görülmektedir.



Şekil 3.7. a) GFET ölçüm bacakları b) GFET test düzeneği

Üretilen GFET’in karakterizasyonu için kaynak bacağına 1 volt değerinde sabit gerilim uygulandı ve kapı bacağına uygulanan gerilim sıfırdan başlanarak artırıldı. Bu işlem devam ederken de okunan değerler kaydedildi. Bu şekilde GFET’in

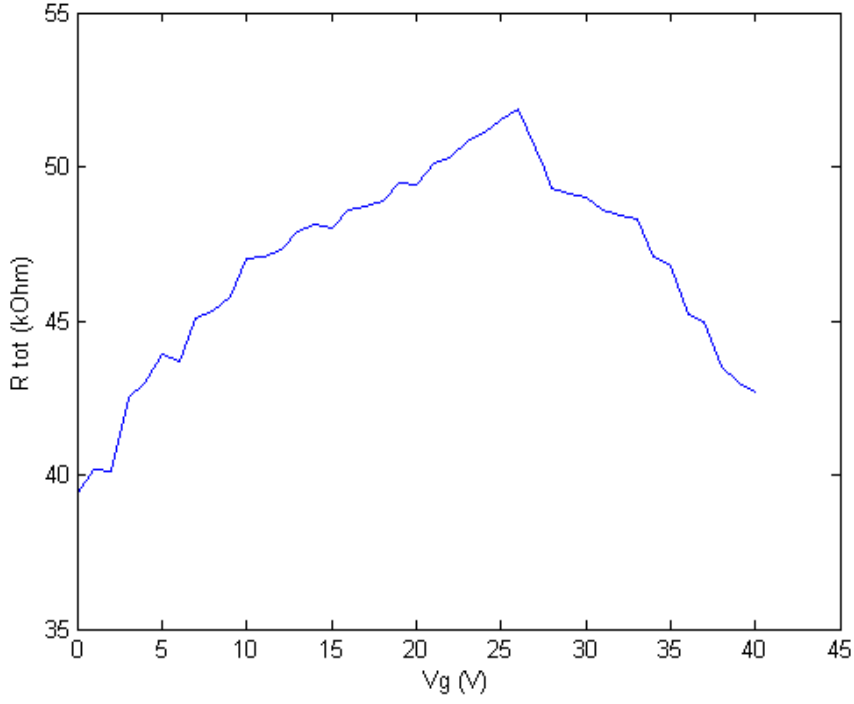
gerilim-akım grafiği elde edildi. Şekil 3.8’de gerilim-akım grafiği görülmektedir. Akım değerinin en düşük olduğu gerilim değeri transistörün dirac noktası yani en düşük iletim veya en yüksek direnç bölgesidir. Bu da yaklaşık olarak 27.5 volt değerine gelmektedir. Bu değer yüksek olmasının birçok sebebi olabilir. Bunlardan biri kapı elektrodunun üzerindeki yalıtkan malzemenin kalınlığının fazla olmasıdır. Üretim planlamasında kapı elektrodu üzerine herhangi bir yalıtkan malzeme konulmayacak ve alüminyumun oksitlenmesi bunu sağlayacaktı ancak yapılan ölçümlerde alüminyum ile grafen kanalının kısa devre olduğu gözlemlenmiştir. Bu şekilde transistör çalışmayacağından bir başka transistörde alüminyumun üzerine fotorezist serilmiştir. Bu gerekli yalıtımı sağlamıştır ancak dirac gerilimini de ötelemiştir. Dirac değerinin yüksek olmasının bir diğer sebebi grafenin üretiminden kaynaklanabilir. Örneğin grafen transfer edilirken grafen üzerinde kalan su molekülleri grafenin dirac değerini etkilemektedir. Bunun yanında kaynak elektroduna uygulanan gerilim değeri de dirac değerini değiştirmektedir.



Şekil 3.8. GFET akım gerilim grafiği

Ayrıca Şekil 3.9’da kapı gerilim değerine bağlı olarak ölçülen iç direnç değeri görülmektedir. Bu grafikte de kapı geriliminin belli bir değerinde iletkenlik minimum

yani direnç maksimum değeri göstermektedir. Bu dirac noktası da yaklaşık olarak 26 volt değerini göstermektedir. Aslında transistörde tek bir dirac noktası olur ancak ölçüm hassasiyetinden dolayı bu değerler birebir aynı çıkmamaktadır. Daha hassas ölçüm yapılırsa birbirlerine daha yakın değerler almaları mümkündür.



Şekil 3.9. GFET gerilim-direnç grafiği

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Tez çalışması sürecinde laboratuvardaki bütün cihazların kullanımı öğrenildi. Bunun yanında MEMS üretim süreçleri ve üretim yöntemleri öğrenildi. Ayrıca maske tasarlama ve bu maskeyi üretimde uygulama becerisi edinildi.

Çalışma sürecinde yaşanan problemlerin çoğunda maddi imkansızlıklar veya ucuza mal etme çabası bulunmaktadır. Bu çalışma için öncelikle maskeye ihtiyaç duyulmaktadır ve maske maliyeti bir öğrencinin karşılayabileceğinden oldukça fazladır. Ayrıca literatür taramalarında görüldüğü üzere GFET üretiminde bilim insanları çoğunlukla metal olarak altını ve yapıştırıcı olarak palladyum veya titanyumu kullanmışlardır. Bu çalışmada ise uzunca süre maliyeti düşük tutma amacıyla gümüş metal olarak üretilmeye çalışılmıştır. Gümüşün olmayacağı anlaşıldığında mecburi olarak altın kullanıldı ve başarılı sonuç verdi. Dolayısıyla çağ ile yarışır bir MEMS üretimi gerçekleştirilmek isteniyorsa laboratuvarın maddi olarak güçlü olmasında fayda vardır.

4.1. Tez Amacının Doğrulanması

Bu çalışma ile maske tasarlaması ve bu maske tasarlamak için kullanılan Klayout programının kullanılması öğrenildi. Ayrıca temiz alanda çalışma tecrübesi edinildi. Bununla birlikte litografi süreçlerinin uygulanması temiz alanda bulunun termal kaplama ve hizalama cihazlarının kullanımı öğrenildi.

Üretim sürecinde birçok metalin üretimi için deneme yapıldı ancak birçoğunda istenilen elde edilmedi. Bunun yanında altının termal kaplama cihazıyla üretim optimizasyonu gerçekleştirildi ve istenilen sonuç elde edildi. Ayrıca termal kaplama cihazıyla alüminyumun da üretilmesi gerçekleştirildi. Daha sonrasında CVD yöntemiyle üretilmiş grafenler transistörlere transfer edildi. Bu transfer sonrasında elde edilen GFET'lerin karakterizasyonu yapıldı. Her ne kadar iç direnci yüksek olsa da üretilen transistörden akım değeri alınması oldukça önemlidir.

Sonuç olarak laboratuvarında yapılacak çalışmalar için metal üretim optimizasyonları gerçekleştirilmiş olup GFET üretimi yapılmış oldu. Daha sonra yapılacak olan GFET uygulamalarının önü açılmış oldu.

4.2. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışmada GFET üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu üretilen GFET temelinden faydalanılarak GFET içeren yeni tasarımlar yapılabilir. Bu daha önce de bahsedildiği gibi bir sensör de olabilir veya bir rezonatör de olabilir. Ayrıca GFET hızlı bir MOSFET gibi düşünülüp baskı devre uygulamalarında da kullanılabilir. Ayrıca grafen harici başka iki boyutlu malzemelerle özgün bir yapı da ortaya çıkarılabilir.

Metal elektrotlarda karşılaşılan sorunlara çözüm getirilip daha düşük maliyetli GFET üretimi de yapılabilir. Bunun yanında tasarımı değiştirip başka tasarımda bir GFET üretimi yapmak da mümkündür.

Laboratuvarın imkanları geliştirilip maddi desteğin de sağlanmasıyla maliyetin ikinci planda olduğu özgün tasarımların daha ön planda olduğu bir çalışma da yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] William F. Brinkman, Member, IEEE, Douglas E. Haggan, and William W. Troutman *A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us*
- [2] Vanston, John. (2020). *BETTERFORECASTS, BETTERPLANS, BETTERRESULTS Enhance the validity and credibility of your forecasts by structuring them in accordance with the five different ways people view the future.*
- [3] L. D. Landau and E. M. Lifshitz *Statistical Physics, Part I II, Pergamon Press, Oxford, 1980.*
- [4] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, *Science, 2004, 306, 666–669.*
- [5] P. R. Wallace, “*The band theory of graphite,*” *Phys. Rev., vol. 71, pp. 622–634, May 1947.*
- [6] Y.-M. Lin, A. Valdes-Garcia, S.-J. Han, D. B. Farmer, I. Meric, Y. Sun, Y. Wu, C. Dimitrakopoulos, A. Grill, P. Avouris, and K. A. Jenkins, “*Wafer-scale graphene integrated circuit,*” *Science, vol. 332, no. 6035, pp. 1294–1297, 2011.*
- [7] Shapira, P., Gök, A., Salehi, F. (2016). *Graphene enterprise: Mapping innovation and business development in a strategic emerging technology. Journal of Nanoparticle Research, 18(9). doi:10.1007/s11051-016-3572-1*
- [8] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, and C. N. Lau “*Superior thermal conductivity of single-layer graphene,*” *Nano Letters, vol. 8, no. 3, pp. 902–907, 2008*
- [9] C. Berger, Z. Song, T. Li, X. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First, and W. A. de Heer “*Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics,*” *The Journal of Physical Chemistry B, vol. 108, no. 52, pp. 19 912–19 916, 2004*

- [10] A. K. Geim and K. Novoselov "The Rise of Graphene," *Nature Materials*, vol. 6, pp. 183–191, 2007
- [11] K. I. Bolotin, F. Ghahari, M. D. Shulman, H. L. Stormer, and P. Kim, "Observation of the fractional quantum hall effect in graphene," *Nature*, vol. 462, no. 7270, pp. 196–199, Nov. 2009.
- [12] Viculis, L. M., Mack, J. J., Kaner, R. B. (2003). A chemical route to carbon nanoscrolls. *Science*, 299(5611), 1361-1361. doi: DOI 10.1126/science.1078842
- [13] Radic, S., Geitner, N. K., Podila, R., Kakinen, A., Chen, P. Y., Ke, P. C., Ding, F. (2013). Competitive Binding of Natural Amphiphiles with Graphene Derivatives. *Scientific Reports*, 3. doi: ARTN 227310.1038/srep02273
- [14] Pei, S. F., Cheng, H. M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210-3228. doi: 10.1016/j.carbon.2011.11.010
- [15] Obraztsov, A. N. (2009). CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION Making graphene on a large scale. *Nature Nanotechnology*, 4(4), 212-213
- [16] Chen, J-H., Jang, C., Xiao, S., Ishigami, M. Fuhrer, M. S. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂. *Nature Nanotech.* 3, 206–209 (2008).
- [17] F. Schwierz, "Graphene Transistors: Status, Prospects, and Problems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 7, pp. 1567-1584, Jul. 2013. doi: 10.1109/JPROC.2013.2257633
- [18] F. Xia, D. B. Farmer, Y.-M. Lin, and P. Avouris, "Graphene Field-effect transistors with high on/off current ratio and large transport band gap at room temperature.", *Nano letters*, vol. 10, no. 2, pp. 7158, Feb. 2010. doi: 10.1021/nl9039636.
- [19] Mendiratta, N., and Tripathi, S. L. (2020). A review on performance comparison of advanced MOSFET structures below 45 nm technology node. *Journal of*

- [20] Schwierz, F. (2010). *Graphene transistors*. *Nature Nanotechnology*, 5(7), 487-496.
doi: 10.1038/nnano.2010.89
- [21] Taur, Y. Ning, T. H. *Fundamentals of Modern VLSI Devices* (Cambridge Univ. Press, 1998).
- [22] Yu-Ming Lin, Keith Jenkins, Damon Farmer, Alberto Valdes-Garcia, Phaedon Avouris, Chun-Yung Sung, Hsin-Ying Chiu, and Bruce Ek *Development of Graphene FETs for High Frequency Electronics*
- [23] Nianduan Lu, Lingfei Wang, Ling Li and Ming Liu *A review for compact model of graphene field-effect transistors*
- [24] McCann, E., Fal'ko, V. I. *Landau level degeneracy and quantum Hall effect in a graphite bilayer*. *Physical review letters*, 96(8), 2006
- [25] Klekachev, Alexander V., et al. "Graphene Transistors and Photodetectors." *Electrochemical Society Interface* (2013): 63.
- [26] Yumeng Liu, Jiyoung Chang, and Liwei Lin *Flexible Graphene FET Gas Sensor Using Polymer as Gate Dielectrics*
- [27] A. Inaba, G. Yoo, Y. Takei, K. Matsumoto, and I. Shimoyama *A GRAPHENE FET GAS SENSOR GATED BY IONIC LIQUID*
- [28] Ji Liang, Xuejiao Chen, Menglun Zhang, Hao Zhang, Daihua Zhang and Wei Pang *An Rf-Mems-Resonator-Driven Graphene Transistor*
- [29] Thomas Mueller, Fengnian Xia and Phaedon Avouris *Graphene photodetectors for high-speed optical communications*
- [30] Bhupendra K. Sharma, Jong-Hyun Ahn *Graphene based field effect transistors: Efforts made towards flexible electronics*

[31] M.C. Lemme, T.J. Echtermeyer, M. Baus, B.N. Szafranek, M. Schmidt, H. Kurz
Towards Graphene Field Effect Transistors



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sait Öztürkmen
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Cihanbeyli 1992
Telefon : 05512414617
e-mail : sait.ozturkmen@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
--------	-----	--------------

Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi	2017
--------	------------------------------	------

Yüksek Lisans

Doktora

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	Konya Gıda ve Tarım Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR