



**İKİ BOYUTLU MALZEMELERDEN NANOAYGIT
TASARIMI ve FABRİKASYONU**

Merve ACAR

**Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL**

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İKİ BOYUTLU MALZEMELERDEN NANOAYGIT TASARIMI ve
FABRİKASYONU**
(Design and Fabrication of Nanodevices Using Two Dimensional Materials)

DOKTORA TEZİ

Merve ACAR

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Erzurum
Eylül, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Merve ACAR tarafından hazırlanan “İki Boyutlu Malzemelerden Nanoaygıt Tasarımı ve Fabrikasyonu” başlıklı çalışması 18/09/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalı, Elektronik Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	
Danışman:	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Tevhit KARACALI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Emre GÜR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Güven TURGUT <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Ün Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL danışmanlığında sunulan “İki Boyutlu Malzemelerden Nanoaygıt Tasarımı ve Fabrikasyonu” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	9	30
Materyal ve Yöntem	6	35
Bulgular	4	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)		Tez Danışmanı
Merve ACAR		Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
15.10.2020		15.10.2020
İmza:		İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma; Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi (DAYTAM), Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Nanoelektronik Laboratuvarında yapılmıştır.

Doktora çalışmamı yaparken bilgi ve deneyimleri ile bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Prof. Dr. Sayın Mehmet ERTUĞRUL'a ve tezin her aşamasında yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Sayın Emre GÜR'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmalarımızda özellikle litografi aşamasında gerekli fiziksel ortamı ve desteği sağlayan çok değerli Prof. Dr. Sayın Hasan EFEOĞLU'na ve gözenekli silisyum üretilmesinde desteklerinden dolayı Prof. Dr. Tevhit KARACALI'ya ve ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getiren, en zor zamanlarda güçlü kalmamı sağlayan annem Birsen ACAR, babam Recep ACAR ve kardeşlerime hem desteklerinden hem de yoğun çalışma tempoma gösterdikleri anlayış ve sabırları için teşekkür ederim.

Merve ACAR

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İKİ BOYUTLU MALZEMELERDEN NANOAYGIT TASARIMI ve FABRİKASYONU

Merve ACAR

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Amaç: Bu çalışmada, iki boyutlu (2B) sürekli filmler üzerine yüksek performanslı elektronik aygıt üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2B malzemeler büyük alan, sürekli, homojen ve yüksek kalitede büyütülmüştür. Farklı kalınlıklarda büyütülen WS_2 ve MoS_2 filmlerin yanı sıra, bu 2B malzemelerden oluşturulan heteroyapıların da fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca sürekli filmler ve heteroyapılar üzerine üretilen aygıtların performanslarının değerlendirilmesi ve FET'lerin ambipolar özellik gösterip göstermeme durumlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: 2B'li MoS_2 ve WS_2 sürekli filmler RFMS (Radyo Frekans Magnetron Saçtırtma) yöntemi kullanılarak tek bir adımda farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. Bu filmlerin yapısal ve morfolojik analizleri için optik mikroskop, SEM, XPS, XRD, AFM, Raman ve Raman haritalama kullanılmıştır. 2B film tabanlı elektronik aygıtlar tek bir litografi adımı ile oluşturulmuştur. Bu aygıtların davranışlarının analiz edilmesi için tez kapsamında geliştirilen bir ölçüm sistemi kullanılmıştır.

Bulgular: Büyütülen filmlerin yapısal, kimyasal, morfolojik ve optik analizlerinden, sürekli, geniş alan ve homojen olarak WS_2 ve MoS_2 filmlerin RFMS yöntemi ile başarılı bir şekilde büyüdüğü gösterilmiştir. Üretilen FET'lerin ambipolar özellik gösterdiği ortaya konulmuştur. Özellikle heteroeklem FET'lerde ambipolaritenin voltaj ile kontrol edilebildiği bulunmuştur.

Sonuç: 2B'li malzemelerin laboratuvar çalışmalarından, endüstriyel devre seviyesindeki uygulamalara geçmesinin önündeki en büyük engel olan büyük alan ve sürekli film olarak büyüme problemine öneri olarak sunulan RFMS yöntemi ile büyük alan ve sürekli filmler elde edilmiştir. Büyütülen filmlerden, aynı alttaş üzerine kolay ve ucuz bir şekilde tek bir litografi adım ile onlarca FET, p-n eklem ve gözenekli silisyum tabanlı FET elde edilmiştir. Üretilen aygıtların elektronik endüstrisinde önemli bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: alan etkili transistör, TMDC, WS_2 , MoS_2 , 2B heteroyapı, gözenekli silisyum.

Eylül 2020, 120 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

DESIGN and FABRICATION of NANODEVICES USING TWO DIMENSIONAL MATERIALS

Merve ACAR

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Purpose: In this study, it is aimed to produce high performance electronic device on two dimensional (2D) continuous films. For this purpose, 2D materials have been grown in large area, continuous, homogeneous and high quality film. In addition to WS₂ and MoS₂ films grown at different thicknesses, the heterostructures formed from these 2B materials have been also physically and chemically characterized. It is also aimed to evaluate the performance of devices produced on continuous films and heterostructures and to examine if FETs show ambipolar features.

Method: 2D MoS₂ and WS₂ continuous films have been grown in different thicknesses in a single step using the RFMS method. Optical microscope, SEM, XPS, XRD, AFM, Raman and Raman mapping have been used for structural and morphological analysis of these films. 2D film based electronic devices have been created with a single step lithography method. A measurement system have been developed within the scope of the thesis to be used in analyzing the behavior of these devices.

Findings: From the structural, chemical, morphological and optical analysis of the grown films, it has been shown that WS₂ and MoS₂ films have been successfully grown by RFMS (Radio Frequency Magnetron Sputtering) method on continuous, large area and homogeneous films. It has been demonstrated that the FETs produced have ambipolar properties. It has been found that ambipolarity can be controlled by voltage, especially in hetero-joint FETs.

Results: Large area and continuous films have been obtained with the RFMS method, which is presented as a suggestion for the solution of the problem of growing as a large area and continuous film, which is the biggest obstacle for the transition of 2D materials from laboratory studies to applications at the industrial circuit level. Tens of FETs, p-n junctions and porous silicon based FETs were obtained on the same substrate, using the grown films, easily and cheaply in a single lithography step. It is concluded that the devices produced have an important potential in the electronics industry.

Keywords: field effect transistor, TMDC, WS₂, MoS₂, 2D heterostructure, porous silicon.

September 2020, 120 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
GİRİŞ.....	1
2B TMDC'lerin Büyütülmesi	5
Tez Çalışmasının Özgünlüğü ve Literatüre Katkısı	11
Tez Çalışması İle Ulaşılan Hedefler	12
KURAMSAL TEMELLER.....	13
İki Boyutlu Malzemeler: Grafen-TMDC	13
TMDC'lerin özellikleri	15
Transistörler	17
Çeşitli TMDC MOSFET Aygıt Karakterizasyonu.....	20
Açma/Kapama oranı ($I_{açma}/I_{kapama}$)	20
Taşıyıcı mobilitesi (μ).....	21
Alteşik salınımı (Subthreshold Swing, (SS))	21
Eşik gerilimi (V_{th})	21
Kontak Direnci Ölçüm Yöntemi: TLM (İletim Hattı Modeli).....	22
Farklı Fet Konfigürasyonları İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	23
FET Performanslarını İyileştirmek İçin Yapılan Çalışmalar	24
2B Yarı İletkenlerde Elektrik Kontaklar	25
p-n Eklem	28
Gözenekli Silisyum (PS)	28
2B Heteroeklem Yapıları ve Uygulamaları.....	30
Ambipolar Davranış Gösteren TMDC Tabanlı Transistörler	33
Optik Litografi	37
Metal kaplama	39
MATERYAL ve METOT	40

2B Malzeme Hazırlanması.....	40
RF Magnetron Saçtırtma Sistemi (RFMS).....	41
2B Malzemelerin Karakterizasyonu.....	42
Optik mikroskop	43
Raman spektroskopisi	43
XPS	44
SEM	45
AFM	45
2B Aygıtların Fabrikasyonu.....	46
Fiziksel maske	47
Fotolitografi	47
Metal kaplama.....	49
Elektriksel Ölçüm Sistemi	51
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	54
WS ₂ İnce Film Tabanlı FET	54
WS ₂ ince film karakterizasyonu	54
WS ₂ tabanlı FET'lerin elektriksel karakterizasyonu	62
WS ₂ /Si p-n Eklem Elektriksel Karakterizasyonu.....	67
WS ₂ /Gözenekli Silisyum Tabanlı FET	69
WS ₂ /Gözenekli silisyum malzeme karakterizasyonu.....	69
WS ₂ /Gözenekli silisyum tabanlı FET elektriksel karakterizasyonu	71
MoS ₂ İnce Film Tabanlı FET	73
MoS ₂ ince film karakterizasyonu	73
MoS ₂ ince film tabanlı FET elektriksel karakterizasyonu.....	78
MoS ₂ /WS ₂ Heteroeklem FET	81
MoS ₂ /WS ₂ heteroeklem malzeme karakterizasyonu.....	81
MoS ₂ /WS ₂ heteroeklem FET elektriksel karakterizasyonu	82
SONUÇ ve ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR.....	90
EKLER	102
EK-1. Büyütme Parametreleri	102
ÖZGEÇMİŞ.....	103

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. TMDC büyütme yöntemlerinin karşılaştırmalı tablosu.....	9
Tablo 2. TMDC'lerin elektronik yapıları.....	16
Tablo 3. 2B heteroeklem tabanlı FET performansları	32
Tablo 4. ezAFM görüntüleme parametreleri	56
Tablo 5. WS ₂ tabanlı FET'e ait aygıt özellikleri	66
Tablo 6. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş büyük alan WS ₂ film tabanlı FET'lerin karşılaştırması	67
Tablo 7. Gözenekli Si ve Si-SiO ₂ alttaş üzerine büyütülmüş WS ₂ tabanlı FET'e ait aygıt özellikleri karşılaştırılması.....	73
Tablo 8. MoS ₂ tabanlı FET'e ait aygıt özellikleri	80
Tablo 9. 10 s büyütülmüş WS ₂ ve MoS ₂ tabanlı FET'e ait karşılaştırmalı aygıt özellikleri....	80
Tablo 10. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MoS ₂ film tabanlı FET karşılaştırma tablosu	81
Tablo 11. WS ₂ , MOS ₂ /WS ₂ Ve MoS ₂ tabanlı FET özellikleri karşılaştırma tablosu.....	86
Tablo 12. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MoS ₂ /WS ₂ heteroyapı tabanlı FET karşılaştırma tablosu.....	86
Tablo 13. WS ₂ ve MoS ₂ Yarıiletken Kaplama Parametreleri	102
Tablo 14. Kontaklar için Ti ve Pt Büyütme Parametreleri	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. VLSI'n gelişimindeki ana kilometre taşlarının kısa bir kronolojisi.	1
Şekil 2. Mikroişlemci performansının yıllara göre değişimi (Rupp)	2
Şekil 3. Transistör uygulamalarında kullanılan yarıiletkenlerin alan etkili mobiliteye göre açma/kapama oranları ve bant boşluğu grafiği.....	3
Şekil 4. TMDC tabanlı uygulamalar: FET, Optik aygıtlar, Bellek aygıtları, Biyosensör, Biyomedikal uygulamalar, Esnek aygıtlar	5
Şekil 5. a) TMDC'lerin CVD ile büyümesinin şematik gösterimi b) Yonga boyutlarında MOCVD ile TMDC malzemenin büyümesinin şematik gösterimi ve yonga boyutlarında büyüyen WS ₂ ve MoS ₂ optik görüntüleri.....	7
Şekil 6. Tek tabakalı 2B TMDC'lerin tek kristallerinin büyük alan ve yonga ölçekli büyümesi a) Si/SiO ₂ alt tabakası üzerinde kenar uzunluğu 120 µm MoS ₂ büyümesi b) Altın alttaş üzerinde milimetre boyutunda WS ₂ büyümesi c) Oksijen destekli CVD kullanılarak safir alttaş üzerinde MoS ₂ büyümesi, tek MoS ₂ alanının kenar uzunluğu 350 µm'ye ulaşmaktadır.....	8
Şekil 7. a) 100 nm kalınlığında WS ₂ numunesinin FESEM görüntüsü. b) WS ₂ filmi ve silikon alttaş gösteren FESEM görüntüsü c) İki katmanlı (genişlik/uzunluk=80 µm/30 µm) ve beş katmanlı (genişlik/uzunluk=100 µm/50 µm) MoS ₂ kanallı üst kapı FET'lerin transfer karakteristikleri içinde: üretilen cihazın optik mikroskopi görüntüsü.....	11
Şekil 8. 2B malzeme ailesi	14
Şekil 9. a) UV'den radyodalgaya kadar 2B malzemelerin foto yanıtları: Soldan sağa doğru h-bN, TMDC, BP ve grafenin elektromanyetik spektrumları ve atomik yapıları b) bant yapıları.....	14
Şekil 10. a) TMDC'lerin MX ₂ formunu oluşturan muhtemel kombinasyonları sunan periyodik elemanlar tablosu b) Oktahedral koordinasyon gösteren altıgen bir yapı TMDC'nin çizimi X-M-X sandviç yapısını oluşturan birim (c) Tek katmanlı TMDC'lerin kesit görünümü (1H ve 1T).....	16
Şekil 11. Transistör çeşitleri ve şematik gösterimleri	18
Şekil 12. TMDC yarıiletken kanalına sahip arka kapı MOSFET'in şematik gösterimi.....	18
Şekil 13. İdeal 2B FET transistör karakteristiği gösterilmektedir. a) p-tipi çıkış karakteristiği b) 2B FET transfer karakteristiği (şeklin içinde uygulanan kapı voltajı (V _{gs}) ile değişen iletim bandı (İB) ve valans bandı (VB) gösterilmektedir c) n-tipi çıkış karakteristiği.....	19

Şekil 14. Kapı geriliminin (V_{gs}) bir fonksiyonu olarak akaç akımı	20
Şekil 15. TLM ölçüm yapısı a) TLM kontak bölgeleri ve ölçüm sistemi b) farklı kontak boşluklarına göre direnç grafiği c) yapı üzerinde bulunan direnç bölgeleri	22
Şekil 16. a) Tek tabaka MoS_2 tabanlı üst kapı konfigürasyonuna sahip FET'in yarı logaritmik transfer karakteristiği b) Atmosfer şartlarında (kırmızı) ve vakum altında (mavi) ölçülen kapsüllenmemiş alt kapı tek tabaka MoS_2 FET'in transfer eğrileri, atmosferik etkilerin cihaz performansı üzerinde olumsuz etkileri olduğunu gösterilmektedir. Şeklin içinde aygıt şematik resmi görülmektedir.	24
Şekil 17. 2B yarıiletken FET'lerde elektrik kontaklarını iyileştirmek için kullanılan yöntemler: a) Temas metallerini ve prosesi değiştirmek. b) Kontak alanlarını katkılarlamak. c) 1T-2H faz mühendisliğinde düzlem içi heteroeklemler d) Grafen üst kontağı e) Grafen kontağı f) 2B yarıiletkenler ve kontak elektrotlar arasına tünel tabakası eklemek	25
Şekil 18. 2B kristalleri lego bloklarına benzer olarak düşünülerek 2B heteroyapıların inşa edilmesi	30
Şekil 19. 2B heteroyapı temelli FET uygulamaları a) Grafen/ WS_2 heteroyapı temelli FET ve V_b -J eğrisi b) Çift kapılı MoS_2/WSe_2 heteroyapısı ve V_D - I_D eğrisi	31
Şekil 20. TMDC heteroyapılar için CVD prosesi a) Dikey WS_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü b) Yatay WS_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü c) WSe_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü	33
Şekil 21. Yığın ($1000\text{ nm} \times 500\text{ nm} \times 10\text{ nm}$) ve ince-pulcuk ($20\text{ nm} \times 20\text{ nm} \times 15\text{ nm}$) MoS_2 tabanlı EDLT'lerin transfer eğrileri gösterilmektedir. Kapı voltajının (V_G) bir fonksiyonu olarak kanal akımındaki (I_{DS}) değişimi ve kapı voltajının (V_G) bir fonksiyonu olarak tabaka iletkenliğinin (σ_{2D}) değişimi. Kanal gerilimi (V_{DS}) her iki cihaz için 0.2V'tur	34
Şekil 22. Ambipolar davranış gösteren çalışmalara ait şematik gösterimler ve eğriler a) 30 nm Al_2O_3 üzerine birkaç katman WS_2 tabanlı transistörün şematik görüntüsü b) Ambipolar davranışın görüldüğü geçiş eğrisi ve çıkış eğrisi c) SiO_2/Si ve PMMA/ SiO_2/Si üzerindeki dört probu MoS_2 aygıtlarının şematik gösterimi d) PMMA üzerinde dört MoS_2 aygıtı için yarı-logaritmik ölçekte V_G geçit voltajının bir fonksiyonu olarak iletkenlik eğrisi e) Cr/Au kontaklarla WSe_2 FET şematik gösterimi f) Birkaç tabaka WSe_2 FET'e ait geçiş eğrisi	36
Şekil 23. Döndürerek kaplama cihazında (spinner) fotorezist kaplama adımları	37
Şekil 24. Optik litografi transfer süreci	38

Şekil 25. Metalizasyon ve Lift-off	39
Şekil 26. Yapılan çalışmanın işlem adımları.....	40
Şekil 27. Magnetron saçtırtma sisteminin şematik resmi.....	42
Şekil 28. RF magnetron saçtırtma cihazı.....	42
Şekil 29. a) Ölçümler için kullanılan Raman b) Bir tabakadan yığının MoS ₂ 'ye kadar Raman spektrumları	44
Şekil 30. XPS cihazı.....	45
Şekil 31. a) Kullanılan AFM'nin fotoğrafı b) AFM şematik gösterimi.	46
Şekil 32. Layout programı kullanılarak tasarlanmış FET maskesi	47
Şekil 33. Kullanılan fotorezist ve kaplama cihazı.....	48
Şekil 34. Ön ısıtma aşaması	48
Şekil 35. Süss Microtec MBJ4 maske hizalayıcı	49
Şekil 36. Desen oluşturma aşaması a) 1:3 (geliştirici:su) çözeltisi b) Kullanılan geliştirici c) Pozlandırma ve geliştirme sonrası mikroskop görüntüsü.....	49
Şekil 37. Metal kaplama aşaması a) Kaplama için hazırlanmış örnekler b) VAKSIS saçtırtma cihazı	50
Şekil 38. Metal kaplama sonrası lift-off prosesi.....	50
Şekil 39. Aygıt, ölçümlerin alınabilmesi için hazır hale getirilmiştir.	50
Şekil 40. Aygıt fabrikasyon adımları	51
Şekil 41. Şematik olarak aygıt elektriksel ölçüm sistemi.....	52
Şekil 42. Üç prob I-V ölçümü için kurulan sistem.....	52
Şekil 43. Üç prop I-V ölçümü için hazırlanan Labview arayüz programı	53
Şekil 44. Farklı sürelerde büyüten WS ₂ filmlerine ait WS ₂ filmi ile Si/SiO ₂ arayüzünü gösteren optik mikroskop görüntüleri a) 1 s b) 5 s c) 10 s d) 30 s.....	54
Şekil 45. Farklı sürelerde büyütülen WS ₂ filmlerin SEM görüntüleri (sağda büyütülmüş SEM görüntüleri) a) 1 s b) 5 s c) 10 s d) 20 s e) 30 s	55
Şekil 46. 1 s büyütülmüş sürekli WS ₂ filminin optik görüntüsü	56
Şekil 47. Farklı sürelerde büyütülmüş WS ₂ filmlere ait topografi görüntüleri, faz görüntüleri ve kesit analizi a) 5s b) 10 s c) 30 s	57
Şekil 48. Farklı sürelerde büyütülen WS ₂ filmlerin Raman ölçümleri	58
Şekil 49. WS ₂ filminin büyütme süresine bağlı frekans farkı (cm ⁻¹) grafiği.....	59
Şekil 50. 5 s büyütülmüş WS ₂ filmi için WS ₂ ince film ile Si/SiO ₂ arayüzeyinde geniş alan Raman haritalama	59
Şekil 51. Farklı sürelerde büyütülen WS ₂ filminin XPS genel spektrumu	60
Şekil 52. Sülfür atomunun tungsten atomuna oranının büyütme süresi ile değişimi	61

Şekil 53. Üretilen WS ₂ ince filmlerin büyütme süresine bağlı a) W _{4f} XPS analizleri b) S _{2p} XPS analizleri	61
Şekil 54. 5 s büyütülmüş WS ₂ ince film için XRD ölçümü	62
Şekil 55. Ti/Pt kontaklara sahip WS ₂ tabanlı FET'in şematik resmi b) 1 s büyütülmüş WS ₂ tabanlı FET'in transfer c) çıkış eğrisi d) 10 s büyütülmüş WS ₂ tabanlı FET çıkış eğrisi	64
Şekil 56. RFMS yöntemi ile 1s, 5 s, 10 s ve 30 s büyütülmüş sürekli WS ₂ film tabanlı FET'in a) transfer eğrisi b) büyütme süresine bağlı mobilite grafiği c) 10 s ve 30 s filmler için kanal uzunluğuna göre direnç grafiği	65
Şekil 57. RFMS yöntemi ile 5 s büyütülmüş WS ₂ sürekli film kullanılarak üretilen FET'in farklı kanal uzunlukları için transfer eğrisi.....	66
Şekil 58. WS ₂ /Si heteroekleminin a) şematik gösterimi b) logaritmik ve c) lineer ekseninde I-V eğrisi.....	68
Şekil 59. Gözenekli Silisyum a) üstten b) yandan SEM görüntüsü	70
Şekil 60. a) Silisyum üzerine b) Gözenekli Silisyum üzerine 5 s büyüyen WS ₂ film SEM görüntüsü	70
Şekil 61. Gözenekli Si/Si üzerine WS ₂ filmin yandan SEM görüntüsü.....	71
Şekil 62. Gözenekli silisyumun gözeneklilik oranı.....	71
Şekil 63. Ti/Pt kontaklara sahip gözenekli Si/WS ₂ tabanlı FET'in a) şematik resmi b) transfer eğrisi c) çıkış eğrisi.....	72
Şekil 64. 10 s büyütülmüş MoS ₂ filmi ile Si/SiO ₂ arayüzüne ait optik mikroskop görüntüsü	73
Şekil 65. 10 s büyütülmüş MoS ₂ film SEM görüntüsü	74
Şekil 66. Farklı sürelerde büyütülen MoS ₂ filmlerinin Raman ölçümleri.....	74
Şekil 67. 10 s büyütülmüş MoS ₂ filmi için MoS ₂ ince film ile Si/SiO ₂ arayüzeyinde geniş alan Raman haritalama	75
Şekil 68. Farklı sürelerde büyütülen MoS ₂ filmlerin genel XPS spektrumu	76
Şekil 69. Farklı sürelerde üretilen MoS ₂ ince filmlerin büyütme süresine bağlı XPS analizleri a) 5 s büyütülmüş örnek S _{2p} b) Mo _{3p} c) 10 s büyütülmüş örnek için S _{2p} d) Mo _{3p}	77
Şekil 70. Sülfür atomunun molibden atomuna oranının büyütme süresi ile değişimi	77
Şekil 71. 10 s büyütülmüş MoS ₂ ince film için XRD ölçümü	78
Şekil 72. Ti/Pt kontaklara sahip MoS ₂ tabanlı FET'in şematik resmi b) 5 s c) 10 s büyütülmüş MoS ₂ tabanlı FET'in logaritmik ve lineer eksen için transfer eğrisi d) 5 s büyütülmüş MoS ₂ tabanlı FET'in çıkış eğrisi.....	79

Şekil 73. 10 s MoS ₂ /10 s WS ₂ heteroyapısının Raman 10 s MoS ₂ ve 10 s WS ₂ karşılaştırmalı Raman ölçümleri.....	82
Şekil 74. RFMS yöntemi ile üstüste büyütülmüş 10 s MoS ₂ /10 s WS ₂ tabanlı FET'in a) şematik resmi b) transfer eğrisi b) çıkış eğrisi d) farklı V _{ds} değerleri için transfer eğrisi	84
Şekil 75. a) WS ₂ tabanlı b) MOS ₂ /WS ₂ heteroeklem tabanlı c) MoS ₂ tabanlı FET çıkış eğrileri.....	85
Şekil 76. WS ₂ tabanlı, MOS ₂ /WS ₂ heteroeklem tabanlı ve MoS ₂ tabanlı FET transfer eğrileri.....	86



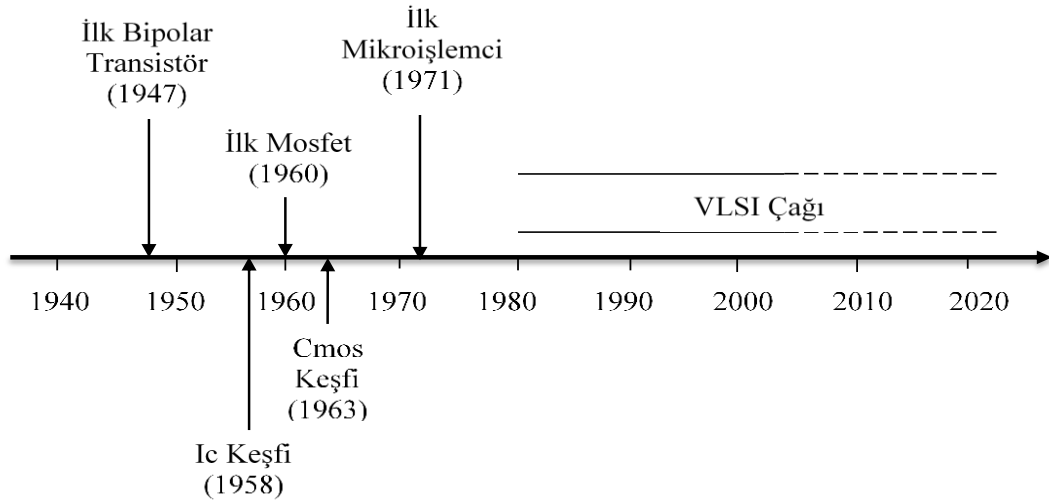
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
Al	Alüminyum
ALD	Atomik Tabaka Biriktirme
Al ₂ O ₃	Alüminyum Dioksit
Ar	Argon
BJT	Doğru Eklem Transistor
BP	Black Phosphorus
Ci	Dielektrik kapasitansı
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DC	Doğru Akım
ϵ_0	Vakum için dielektrik sabiti
ϵ_r	SiO ₂ bağlı dielektrik sabiti
EDLT	Elektrikli Çift Katmanlı Transistör
EBL	Elektron Demet Litografisi
eV	Elektronvolt
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FET	Alan Etkili Transistör
h-bN	Altıgen bor Nitrür (hexagonal boron Nitride)
HfO ₂	Hafnium oksit
g_m	Transfer iletkenliği
GaN	Galyum Nitrür
IC	Entegre Devre
İB	İletim Bandı
I _{ds}	Kaynak–akaç akımı
JFET	Birleşim Alan Etkili Transistör
LED	Işık Yayan Diyot
L _T	Transfer uzunluğu
L	Kanal uzunluğu
MoS ₂	Molibden Disülfür
MoSe ₂	Molibden Diselen
MoO ₃	Molibden Oksit

MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistor
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
NAND	Ve Değil
NOR	Veya Değil
NO ₂	Azot Dioksit
NH ₃	Amonyak
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
PLD	Darbeli Lazer Biriktirme
PMMA	Polimetil Mekotrilat
R _s	Tabaka direnci
R _c	Kontak direnci
RF	Radyo Frekansı
RFMS	Radyo Frekans Magnetron Saçtırtma
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
S	Silikon
SiO ₂	Silikon Dioksit
SS	Alteşik Salınımı (subthreshold swing)
TLM	İletim Hattı Modeli
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
Ti	Titanyum
TMDC	Geçiş Metali Dikalkojeni
UV	Ultraviole (Morötesi)
V _{gs}	Arka kapı gerilimi
V _{ds}	Kaynak-akaç gerilimi
VB	Valans Bandı
V _{th}	Eşik gerilimi
vdW	van der Waals
VLSI	Çok Geniş Ölçekli Tümlleşim
W	Kanal genişliği
WS ₂	Tungsten Disülfür
WSe ₂	Tungsten Diselen
XPS	X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X-ışını Difraksiyonu
μ	Mobilite
ρ _c	Özdirenç

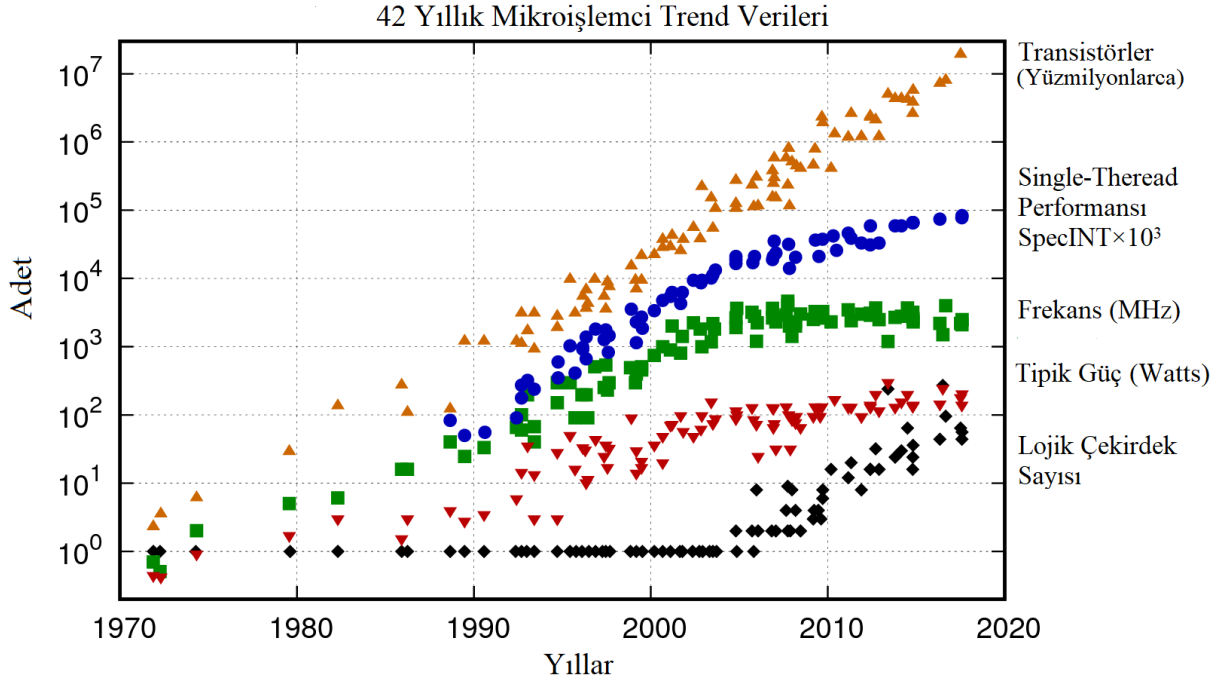
GİRİŞ

Geleceğin teknolojilerinde en önemli ilerlemeler elektronik cihazlar ve bu cihazların etkin olarak kullanıldığı teknolojik alanlarda gerçekleşmektedir. Sinyal yükseltme ve değiştirme özelliklerinden dolayı birçok elektronik cihazın en temel aygıtlarından biri transistörlerdir. Transistörler tek başına üretilebildiği gibi entegre devreler için milyarlarca bir arada da üretilebilmektedir. Transistör türlerinden olan metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), mikroişlemciler ve tümleşik devrelerin önemli bir parçasıdır. İlk olarak 1930'ların başında Lilienfeld ve Heil alan etkili transistörlerin prensibini göstermişlerdir (Edgar 1930). Bardeen ve Brattain 1940'ların sonlarında ilk Ge tabanlı bipolar nokta-kontak transistörü üretmişlerdir. Ligenza ve Spitzer, 1960 yılında Si-SiO ilişkisini kullanarak MOS sistemleri geliştirmişlerdir (Ligenza and Spitzer 1960). Aynı yıl Khang ve Atalla SiO₂ (Silisyum Dioksit) kapı yalıtkanı kullanarak silisyum esaslı ilk MOSFET'i üretmişlerdir (Kahng 1960). 1960 ve 1970'li yıllarda n- ve p-kanal MOSFET'ler bir silisyum çip üzerinde devre fonksiyonlarını uygulamak için bipolar transistörler ile birlikte yaygın olarak kullanılmıştır. MOSFET'ler bipolar aygıtlara göre daha yavaş olmasına rağmen, en basit MOSFET sadece dört litografi ve tek bir katkılama adımı kullanılarak fabrikasyonu yapılacak kadar basit üretim aşamalarına sahiptir. 1963 yılında CMOS'un keşfi ile n- ve p-kanal MOSFET'in aynı alttaş üzerinde fabrike edilmesi entegrasyon seviyesinde büyük bir atılım olarak görülmektedir (Şekil 1). Bu sayede milyarlarca transistör içeren mikroişlemciler ile daha hızlı, daha düşük maliyetli ve daha düşük güç tüketimine sahip sistemler elde edilebilmiştir.



Şekil 1. VLSI'nın gelişimindeki ana kilometre taşlarının kısa bir kronolojisi.

Geçtiğimiz yarım yüzyılda CMOS teknolojisi maliyet ve boyut bakımından çok büyük bir değişim geçirmiştir. Moore Yasasına göre yaklaşık her 18 ayda bir birim alandaki transistör sayısındaki iki kat artış ve öngörüsü, son yıllarda sapmaya başlamıştır. Bunun temel sebebi transistörlerde kullanılan geleneksel yarıiletken malzemelerin limitlerine ulaşılması ve litografi işlemlerindeki sınırlandırmalardır. Şekil 2’de görüldüğü gibi güç tüketimi, çalışma frekansı gibi birçok transistor performans ölçütü ~2005 yılından sonra durağanlaşmıştır (Rupp).



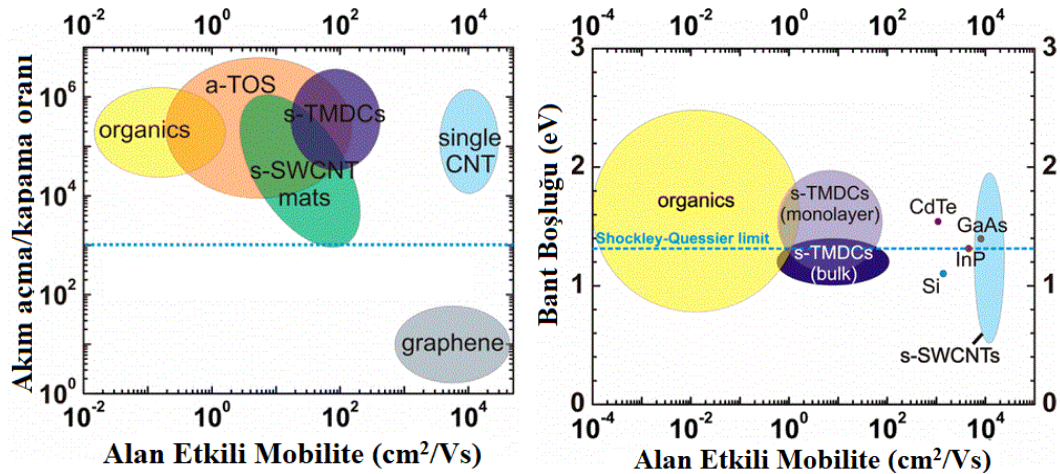
Şekil 2. Mikroişlemci performansının yıllara göre değişimi (Rupp)

Silisyum yarıiletkenin kullanıldığı transistörlerin yüksek güç gerektiren aygıt uygulamalarında yetersiz kalması üzerine yeni malzeme geliştirilmesine yönelik çalışmalar son zamanlarda önem kazanmıştır. Yapılan çalışmalar 2B malzemelerin üstün elektronik, mekanik ve optik özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. 2B malzemeler ile nano boyutta üstün performans gösteren transistörleri üretmek mümkün olabildiği literatürde gösterilmiştir. Bu nedenle alan etkili transistörler gibi elektronik aygıtların iki boyutlu malzeme kullanılarak geliştirilmesine yönelik araştırmalar son yıllarda en çok çalışılan konular arasına girmiştir.

İki boyutlu malzemelerden olan grafen, ilk olarak Wallace (Wallace 1947) tarafından teorik olarak öngörülmüş ve (Novoselov *et al.* 2004) tarafından deneysel olarak elde edilmiştir. Grafende karbon atomları ile grafitin tek katmanlı altıgen bal peteği örgüsünde düzenlenmiştir. Yüksek elektron mobilitesi, yüksek ısı iletkenlik ve yüksek Young modülü gibi olağanüstü elektronik, optik, mekanik ve termal özellikler grafende mevcuttur (Zhang *et al.* 2005; Balandin *et al.* 2008). Bu özellikler grafeni 2B malzeme ailesinde temsili bir malzeme haline getirmiştir. Örneğin, grafenin taşıyıcı mobilitesi oda sıcaklığında $10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, düşük sıcaklıklarda ise $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ dir (Dean *et al.* 2010). Bunlara ek olarak, grafenin Young modülü, ~1 TPa kadar yüksek

ölçülmüştür. Bu grafeni dünyadaki en yüksek mukavemetli malzeme yapmıştır (Lee *et al.* 2008). Bununla birlikte grafen; sıfır bant aralığı ve elektronik ve optoelektronikteki uygulamalarını sınırlayan zayıf ışık soğurması gibi dezavantajlara da sahiptir (Neto *et al.* 2009; Schwierz 2010). Grafenin sıfır bant aralığına sahip olması üretilen transistör aygıtlarında depolasyon tabakasının oluşumunu engellemesinden dolayı, grafen alan etkili transistörlerde etkin bir şekilde kullanılamamaktadır. Bu nedenle grafenin yanında grafene benzer 2B yarıiletken malzemeler geliştirilmiş ve bu malzemelerden üretilen aygıtların performanslarının grafen aygıtlara göre daha iyi olacağı öngörülmüştür.

Her bir atomun birbirine güçlü kovalent bağlarla bağlı olduğu, tabakalar arasında da zayıf van der Waals (vdW) bağları olan malzemeler 2B malzeme ailesine aittir (Butler *et al.* 2013; Xie *et al.* 2017). 2B yarıiletkenler arasında TMDC'ler malzeme bileşimi, kalınlık ve kristal faz gibi koşullara bağlı olan ayarlanabilir bant aralığı gibi ilginç elektronik özellikler sergilerler (Wachter *et al.* 2017). Ayrıca TMDC'lerin 2B doğası, kalınlık kontrollü kuantum hapsine ve katmanlı yapıların örgü uyumsuzluğu olmadan istiflenmesine izin vermektedir. Bu durum, elektronik uygulamalar için malzemeler üzerinde oldukça büyük serbestlik sağlamaktadır (Liu *et al.* 2016; Ciarrocchi *et al.* 2018). Şekil 3'te görüldüğü gibi TMDC'lerin grafen dâhil olmak üzere diğer yarıiletkenlerle alan etkili mobiliteler ve açma/kapama oranları karşılaştırılmıştır. Grafenin yüksek mobilitelere sahip olmasına karşın bant aralığı olmadığından dolayı açma/kapama ($\sim 10^1$) oranının düşük olduğu görülmektedir (Jariwala *et al.* 2014). TMDC'lerin elektronik uygulamalar için yüksek potansiyele sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. Transistör uygulamalarında kullanılan yarıiletkenlerin alan etkili mobilitelere göre açma/kapama oranları ve bant boşluğu grafiği (Jariwala *et al.* 2014)

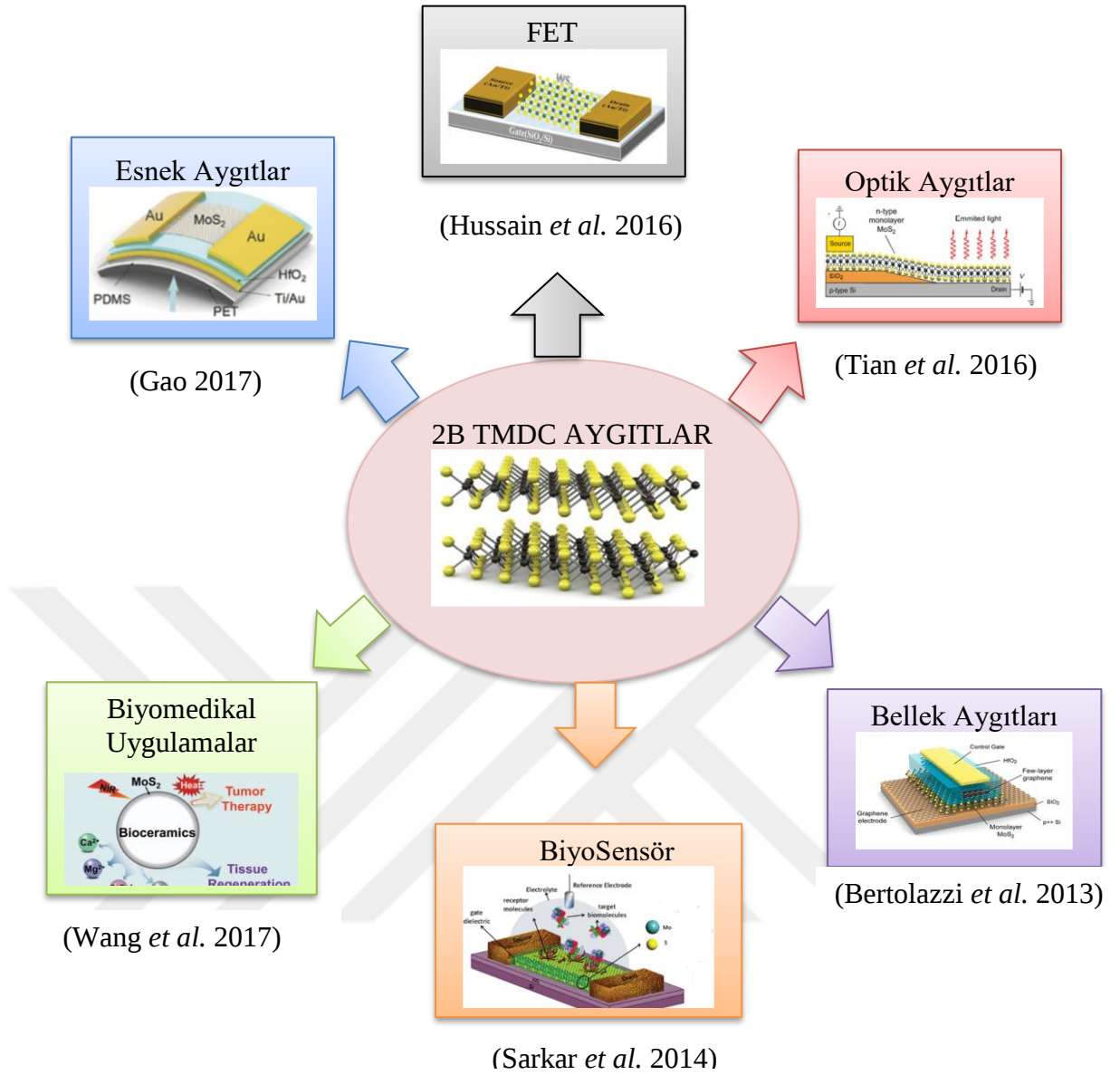
Mak *et al.* (2010) tarafından araştırılan ilk tek tabakalı 2B yarıiletken MoS₂ (molibden disülfür); tek tabakada doğrudan bant aralığına, birkaç tabaka ve yığın halde dolaylı bant aralığına sahip olduğu görülmüştür (Mak *et al.* 2010). Tek katmanlı MoS₂'nin özelliklerinin

keşfi WS_2 (tungsten disülfür), $MoSe_2$ (molibden diselen) ve WSe_2 (tungsten diselen) gibi diğer TMDC malzemelerin incelenmesine bir kapı açmıştır.

Son on yılda, 2B TMDC tabanlı elektronik ve optoelektronik alanında araştırmalar yürütülmektedir. Yarıiletken TMDC'ler, çeşitli aygıtların özellikle de üretimi nispeten basit olan alan etkili transistörlerin (FET'ler) gerçekleştirilmesi için geniş çapta araştırılmıştır. TMDC'lerin oldukça geniş bant yapıları nedeniyle optoelektronik ve fotonik aygıt uygulamalar için oldukça ilgi çekmiştir (Xia *et al.* 2014; Mak and Shan 2016; Gong *et al.* 2018; Huo and Konstantatos 2018). İki boyutlu MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 ve WSe_2 gibi TDMC malzemeler ile FET (Hussain *et al.* 2016), esnek cihazlar (Gao 2017), bellek aygıtları (Bertolazzi *et al.* 2013), optik cihazlar (Tian *et al.* 2016), sensörler (Sarkar *et al.* 2014), biyosensörler (Wang *et al.* 2017) ve daha fazlası (Choi *et al.* 2017; Shim *et al.* 2017) geliştirilmiş ve çeşitli uygulamalarda birçok avantajlarından dolayı kullanılmışlardır (Şekil 4).

Büyük yüzey/hacim oranlarından dolayı kimyasal algılama, 2B yarıiletkenlerin önemli bir uygulamasıdır. Örneğin, NO_2 ve NH_3 gazlarının yüksek hassasiyetli tespiti için çeşitli 2B malzeme tabanlı sensörler geliştirilmiştir (Liu *et al.* 2014; Abbas *et al.* 2015). Bunlara ek olarak 2B yarıiletkenlerden yapılan FET dijital elektronikte kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Wang *et al.* 2012; Fiori *et al.* 2014; Yu *et al.* 2015). Örneğin, CMOS mantık kapıları (NAND, NOR, XNOR), kenar tetiklemeli register ve DC-DC dönüştürücüler MoS_2 tabanlı aygıtlar kullanılarak geliştirilmiştir (Yu *et al.* 2016). Dijital invertörler, frekans katlayıcılar ve analog amplifikatörler de, çeşitli 2B malzemeler kullanılarak üretilmiştir (Zhu *et al.* 2015).

Özet olarak 2B malzemeler benzersiz özellikleri ve heteroyapı oluşturabilme kabiliyetleri sebebiyle gelecek elektroniği için umut verici malzemelerdendir. Bununla birlikte bu amaçlar doğrultusunda 2B malzemelerden kontrol edilebilir kalınlıkta, büyük alan, sürekli ve yüksek kalitede film oluşturmak önem arz etmektedir.



Şekil 4. TMDC tabanlı uygulamalar: FET, Optik aygıtlar, Bellek aygıtları, Biyosensör, Biyomedikal uygulamalar, Esnek aygıtlar

2B TMDC’lerin Büyütülmesi

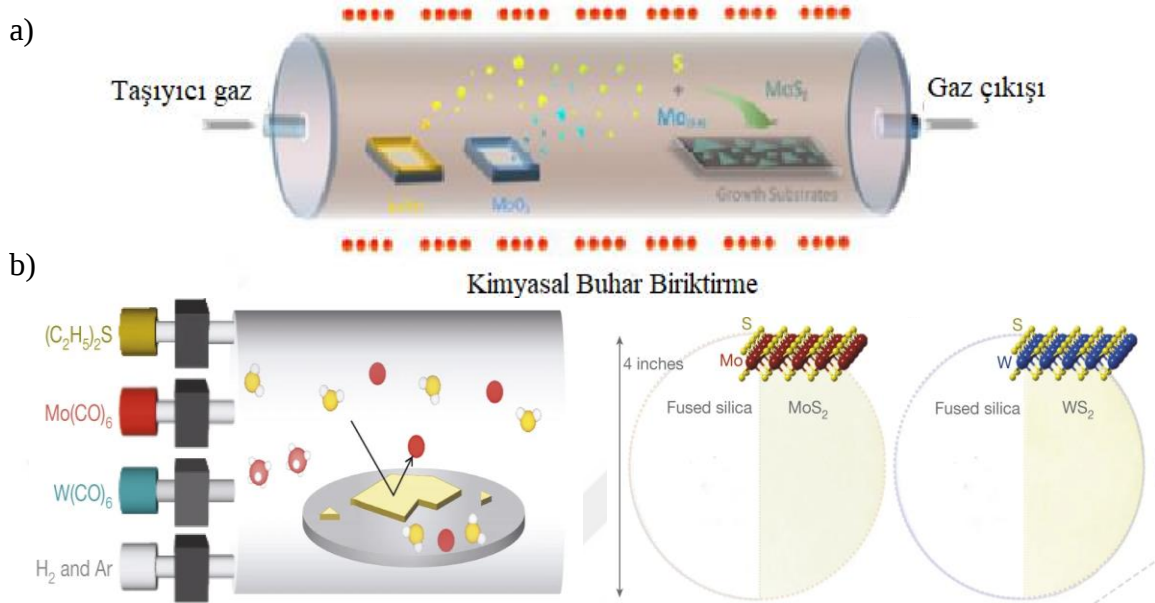
Herhangi bir uygulamada bir malzemenin kullanılma potansiyelinin belirlenmesi için malzemelerin özelliklerinin araştırılması ve malzeme büyütülmesi ilk adımdır. 2B malzemeler genel olarak yukarıdan aşağı: mekanik ayrılma, sıvı faz ayrılma ve lazer inceltme; aşağıdan yukarı: kimyasal buhar biriktirme (CVD), metalorganik-CVD (MOCVD), darbeli lazer biriktirme (PLD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), atomik tabaka biriktirme (ALD) ve saçtıtma (SPUTTER) yöntemi olmak üzere iki farklı ana büyütme yöntemi ile elde edilebilmektedir.

Scotch tape (selobant) bazlı mekanik ayrılma yaklaşımı ile grafen, altıgen bor nitrür (h-bN), MoS₂, MoSe₂, WS₂ ve vd. gibi 2B malzemeler yığın kristallerinden birkaç tabaka veya tek tabakaya indirilebilir (Novoselov *et al.* 2004; Novoselov *et al.* 2005; Radisavljevic *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2012; Li *et al.* 2014; Cui *et al.* 2015; Zhao *et al.* 2017). Genel olarak, mekanik

ayrılma yöntemi ile kolay, erişilebilir yüksek kalitede mikrometre ölçeğinde tek tabaka 2B malzemeler elde edilebilir. Bu yöntem temel fizik ve aygıt araştırmalarında kullanılmak üzere örnek hazırlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem ile istediğimiz boyutta ve kalınlıkta 2B malzeme oluşturulması herhangi bir şarta bağlı olmadığından tekrarlanabilirliği oldukça düşüktür. Bu nedenle kolay bir yöntem olmasına karşın kullanışlı ve seri üretime uygun bir yöntem değildir. Ayrıca yukardan aşağıya büyütme yöntemlerinden bir diğeri olan sıvı faz ayırma (Coleman *et al.* 2011; Nicolosi *et al.* 2013; Jawaid *et al.* 2016) ve lazer inceltme (Castellanos-Gomez *et al.* 2012) yöntemleri de literatür oldukça yer almıştır. Fakat bu yöntemler ile de kalınlık kontrolü ve büyük alan film elde etme problemi yaşanmıştır. Ayrıca sıvı faz ayrılma yöntemi ile üretilen malzemelerin kalitesinin kimyasallarla etkileşimden dolayı genellikle elektronik aygıtlar için düşük olduğu görülmüştür (Serna *et al.* 2016).

TMDC tabanlı aygıtları laboratuvar çalışmalarından endüstriyel devre seviyesinde uygulamalara taşıyabilmek için yüksek kaliteli, yonga ölçekli ve sürekli film elde etmek zaruri olmuştur. Bu amaçla ölçeklenebilir sentezleme yöntemi geliştirmek üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır. Yukarıdan aşağıya yöntemlerin aksine TMDC malzemeler, CVD (Lee *et al.* 2012; Gao *et al.* 2015; Xu *et al.* 2018), MOCVD (Kang *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2018), PVD, PLD (Ullah *et al.* 2016; Juvaid and Rao 2020) ve ALD gibi aşağıdan yukarı yöntemler kullanılarak iyi kalitede ve boyutları kontrol edilebilir tek tabaka veya birkaç tabaka 2B malzemeler üretilmiştir. Aşağıdan yukarıya büyüme yöntemler arasında, CVD yöntemi yüksek kaliteli ve yonga ölçekli TMDC filmlerinin düşük maliyetli bir şekilde büyümesi için ölçeklenebilir ve kontrol edilebilir bir seçenektir. TMDC'lerin CVD ile büyüme aşaması, tek aşamalı doğrudan biriktirme ve iki aşamalı olarak metal filmlerin buhar kalkojenleştirilmesi olarak kategorize edilebilir. Şekil 5a'da görüldüğü gibi MoS₂'nin tek tabaka olarak sentezlenmesinde geçiş metali oksidi olarak MoO₃ ve kalkojen kaynağı olarak da sülfür tozları kullanılmıştır (Li *et al.* 2015). Kang *et al.* (2015) çalışmalarında sülfür için gaz fazı kaynağı olarak (C₂H₅)₂S ve Mo veya W için gaz fazı kaynağı olarak Mo(CO)₅ veya W(CO)₅ kullanılan bir MOCVD işlemi geliştirmiştir (Kang *et al.* 2015). Bu tekniği kullanarak, kuvars attaşlar üzerinde MoS₂ ve WS₂ filmlerinin 4 inçlik yonga üzerine büyümesini sağlamışlardır ve tek katmanlı bu filmler tüm yonga üzerinde yapısal süreklilik ve homojenlik göstermiştir (Kang *et al.* 2015). MOCVD ile yapılan büyütme katman katman büyüme olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu, 10 µm'ye kadar büyük tane boyutlarına sahip MoS₂ ve WS₂'nin uniform ve tek tabakalı filmlerin büyümesini kolaylaştırmıştır. MOCVD ile büyütmede alttaşın tek tabakalı malzeme ile tam olarak kaplanması için nispeten uzun bir zamana (26 saat) ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir (Şekil 5b). MOCVD yönteminin WSe₂ film büyütülmesi için kullanıldığı da rapor edilmiştir, MOCVD ile WSe₂, MoS₂'den çok daha küçük tane boyutlarına sahip olduğu

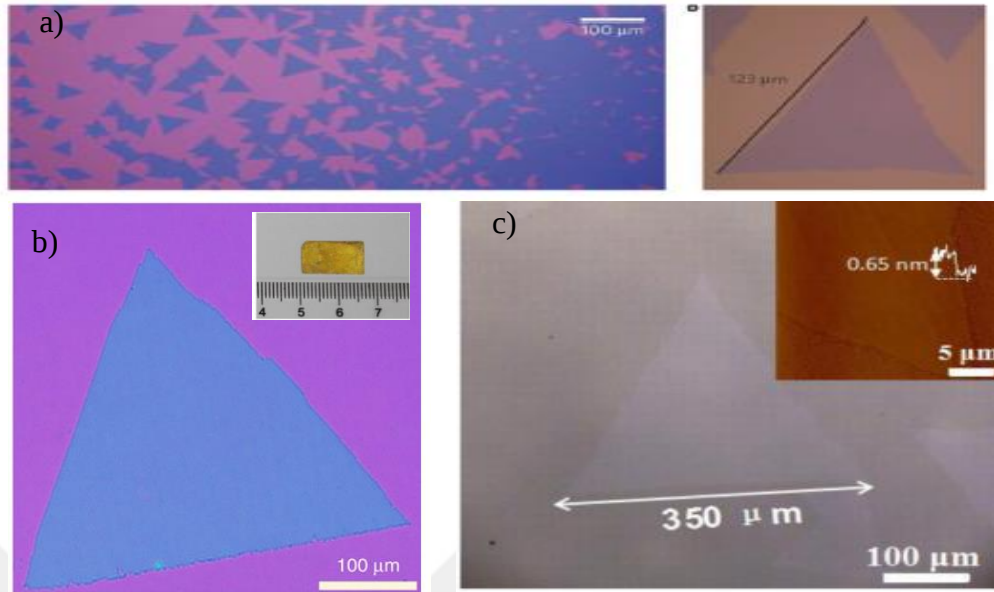
görülmüştür (Eichfeld *et al.* 2015). MoS₂ ve WSe₂ büyümesi arasındaki farklılığın, farklı öncüllerin kullanılmasından ve Se bazlı öncülerin düşük reaktivitesinden kaynaklandığı öngörülmüştür.



Şekil 5. a) TMDC'lerin CVD ile büyümesinin şematik gösterimi (Li *et al.* 2015) b) Yonga boyutlarında MOCVD ile TMDC malzemenin büyümesinin şematik gösterimi ve yonga boyutlarında büyüyen WS₂ ve MoS₂ optik görüntüleri (Kang *et al.* 2015)

Şekil 6a'da görüldüğü üzere Van Der Zande *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada 120 µm kenar büyüklüğüne sahip tek tabakalı MoS₂ sentezlenmiştir (Van Der Zande *et al.* 2013). Alttaş olarak metal tabaka kullanılması, büyük TMDC taneleri üretmek için bir başka etkili yoldur (Shi *et al.* 2014; Gao *et al.* 2015; Shi *et al.* 2015). Örneğin, Şekil 6b'de Gao *et al.* (2015) kükürt ve tungsten kaynakları olarak kükürt ve WO₃ tozları, alttaş olarak bir Au tabaka kullanmış ve üçgen tek tabakalı WS₂'nin bir milimetre mertebesinde büyümesini gerçekleştirmiştir (Gao *et al.* 2015). Şekil 6c'de Chen *et al.* (2015) oksijen destekli bir CVD süreci geliştirmiş; safir alttaş üzerinde 350 µm tek katmanlı MoS₂ sentezi gerçekleştirmiştir (Chen *et al.* 2015). TMDC'lerin büyüme mekanizmasını anlamak; çok büyük tane sınırlarına sahip kristalleri büyütebilmek ve yonga boyutlarında büyütme yapabilmek için önemlidir (Liu *et al.* 2015). Fei *et al.* (2016) TEM gözlemleri yoluyla MoS₂'nin çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasını incelemişlerdir (Fei *et al.* 2016). Bu çalışma, MoS₂ ve diğer MX₂ yapılarının büyüme mekanizmasını anlamak için oldukça yararlı olmuştur. Özellikle, MoS₂'nin çekirdeklenme yoğunluğunu baskılayarak ve gaz halindeki büyütme öncü konsantrasyonunu optimize ederek Lin *et al.* (2015) rutin bir CVD kurulumunda kenar uzunluğu 300 µm'den büyük olan MoS₂ alanlarının büyümesini başarıyla gerçekleştirmiştir (Lin *et al.* 2015). Başka bir çalışmada Gong *et al.* (2016) taşıyıcı gazın akış hızını ayarlayarak MoSe₂'nin çekirdeklenme

yoğunluğunu azaltmış ve milimetre boyutunda tek kristalli MoSe₂ büyütmüşlerdir (Gong *et al.* 2016).



Şekil 6. Tek tabakalı 2B TMDC'lerin tek kristallerinin büyük alan ve yonga ölçekli büyümesi a) Si/SiO₂ alt tabakası üzerinde kenar uzunluğu 120 μm MoS₂ büyümesi (Van Der Zande *et al.* 2013) b) Altın alttaşı üzerinde milimetre boyutunda WS₂ büyümesi (Gao *et al.* 2015) c) Oksijen destekli CVD kullanılarak safir alttaşı üzerinde MoS₂ büyümesi, tek MoS₂ alanının kenar uzunluğu 350 μm 'ye ulaşmaktadır (Chen *et al.* 2015).

CVD ile sentezlenmiş filmler, daha fazla safsızlık ve kusurun varlığı (Van Der Zande *et al.* 2013; Lee *et al.* 2015), kristalin yönelimleri (Yu *et al.* 2017), karmaşık tane sınırları (Lee *et al.* 2015) ve sürekli film üzerinde çok tabakalı adalar (üst üste) (Fei *et al.* 2016; Xu *et al.* 2018) gibi özellikler nedeniyle mekanik ayrılmış filmlerden farklılık gösterirler. Bu nedenle, CVD ile sentezlenmiş TMDC aygıtlarındaki elektrik transfer özellikleri genellikle daha fazla yük saçılımına sebep olur, bu durumun da yüksek performanslı aygıt elde etme konusunda büyük bir engel oluşturduğu görülmüştür (Schulman *et al.* 2018). Ayrıca CVD yönteminin yüksek alttaşı sıcaklığı gerektirmesinden dolayı her türlü alttaşı kullanılamaması, film kalınlık kontrolünün zor olması, film büyüme sürecinin yavaş olması ve sürekli film elde edilememesi gibi dezavantajları bulunmaktadır.

ALD ve diğer bazı büyütme yöntemleri için, ilk önce ince bir metal veya metal oksit öncülleri ile film alttaşı üstüne büyütülür, ardından sülfürizasyon işlemi uygulanır. Isıtma ve sülfürizasyondan sonra, metal veya metal oksit film, çok sayıda küçük pulcuğa dönüştürülür ve bu durumda oldukça küçük kristal boyutlarında MX₂ filmlerine sebep olur. Bu metotla büyütülmüş filmlerde genel olarak düşük elektronik aygıt performansı elde edilmiştir (Song *et al.* 2013). Grafenin (Wu *et al.* 2016) ve MoS₂ büyümesinde (Lin *et al.* 2015) gösterildiği gibi, bu tür işlemlerde MX₂'nin çekirdeklenme yoğunluğunu azaltılabilirse, ALD ve benzeri

yöntemler ile yüksek elektronik performansa sahip geniş alan ve yonga boyutunda MX₂ filmler büyütme mümkündür. ALD yöntemi MoO₃ film oluşturmak için kullanılmıştır; daha sonra bu film sülfür ile reaksiyona sokularak santimetre boyutlarında MoS₂ film elde edilmiştir (Martella *et al.* 2016). ALD yöntemi ile sentezlenen filmin tane boyutu çok küçüktür (onlarca nanometre) ve çok sayıda tane sınırı vardır. Bu nedenle bu yöntem ile büyütülen 2B filmlerin yüksek performanslı elektronik uygulamalarda kullanımını sınırlıdır.

2B malzemelerde büyük tane boyutlarında ve yonga boyutunda tek kristalli büyümedeki gelişmelere ek olarak 2B malzeme sentezi için daha fazla araştırma gerektiren bazı ilginç ve önemli hususlar vardır. Örneğin, bunlardan biri esnek, giyilebilir ve bükülebilir cihazlar için 2B malzemelerin iyi mekanik sağlamlığından faydalanabilen; esnek polimerik bazlı alttaşlar üzerindeki 2B malzemelerin düşük sıcaklıkta büyütülmesidir (Ahn *et al.* 2015; Lim *et al.* 2016). TMDC malzemelerin büyütülmesinde kullanılan bazı yöntemler Tablo 1.'de avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Tablo 1. TMDC büyütme yöntemlerinin karşılaştırmalı tablosu

	Büyütme Tekniği	Avantaj	Dezavantaj
Yukarıdan aşağıya	Mekanik ayırma	- İyi kalitede kristaller elde edilir - Hızlı bir işlemdir	- Kalınlık kontrollü yapılamaz - Ölçeklendirilemez - Tekrarlanabilirliği bir şarta bağlı değildir - Büyük alan filmler elde edilemez - Sürekli film elde edilemez
	Sıvı faz ayırma	Yüksek ölçeklendirilebilirlik	- Kristal kalitesinde bozulma olur - Kalınlık kontrolü yapılması zordur - Mekanik ayırma yöntemine göre zaman alıcıdır - Sürekli film elde edilemez
Aşağıdan yukarıya	MOCVD	Yüksek ölçeklendirilebilirlik	- Kusur kontrolü zordur - Zaman alıcıdır - Maliyetlidir
	Toz Buharlaştırma	Yüksek ölçeklendirilebilirlik	- Kusur kontrolü zordur - Uniform film elde etmek zordur - Sitokiyometri kontrolü zordur
	CVD	- Yüksek ölçeklendirilebilirlik - Büyük taneli (flake) filmler	- Yüksek alttaş sıcaklığı gerektirir - Zaman alıcıdır - Kalınlık kontrolü zordur - Çok sayıda tane sınırı vardır - Sürekli film elde edilememesi
	ALD	- Yonga boyutunda büyüme - Katman katman büyüme	- Kusur kontrolü zordur - Katman sayısını kontrol etmek zordur - Tane boyutu çok küçüktür (onlarca nanometre) - Çok sayıda tane sınırı vardır
	Saçtırma (Sputter)	- Yonga boyutunda büyüme - Ucuz ve kolay - Sürekli film elde edilebilir - Kalınlık kontrolü kolay - Homojen film	- Sitokiyometri kontrolü zordur - Kristal kalitesinde bozulma - Yüksek vakum gereksinimi

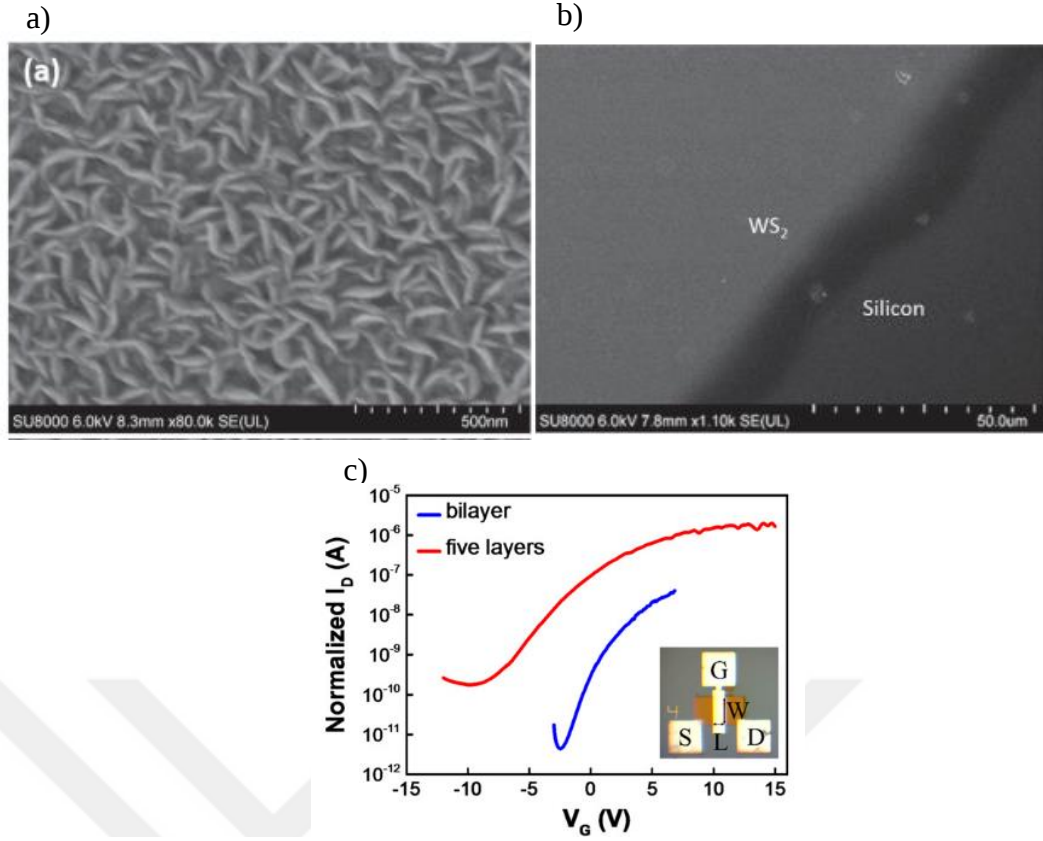
Yonga ölçeğinde homojenliğin sağlanması entegre devrelerin büyük ölçekli üretimi için diğer bir önemli konudur, fakat bu konuyla ilgili sadece birkaç çalışma bulunmaktadır (Smithe

et al. 2017; Yu *et al.* 2017). Yonga ölçekli TMDC sürekli film tabanlı cihazların keşfi hala başlangıç aşamasında olsa da, bunların üretim süreci geleneksel CMOS üretim süreciyle oldukça uyumludur. Bu filmlerin kalitesini artırmak ve bu filmler ile aygıtlar yapmak gelecek elektroniği için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Sürekli film elde edilmesine alternatif bir yaklaşım olarak, alttaşlar üzerine ince bir metal katmanı buharlaştırılmış ve ardından sülfür içeren ortamlarda sülfürleme yapılmıştır (Zhan *et al.* 2012; Laskar *et al.* 2013; Lee *et al.* 2014; Orofeo *et al.* 2014).

Diğer bir sürekli film oluşturma yöntemi olan bu tezde önerilen yöntem olan saçtırtma yöntemidir. Saçtırtma yöntemi ile yonga ölçekli, birkaç tabaka, sürekli ve istenilen kalınlıkta 2B malzeme üretimi son zamanlarda oldukça popüler bir konu olmuştur. Bu yöntem endüstriyel kaplamalar, entegre devreler ve düz panel ekranlar için uniform, geniş alanlı ve yüksek kaliteli ince filmler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Saçtırtma yöntemi kullanılarak alttaş üzerine metal (W, Mo) kaplanıp daha sonra termal sülfürizasyon uygulanarak iki aşamalı olarak TMDC film elde edilmiştir (Wei *et al.* 2019). Bir diğer çalışmada da ilk olarak WO₃ filmi saçtırtma yöntemi ile kaplanmış daha sonra sülfürlenerek WS₂ filmi elde edilmiştir (Hussain *et al.* 2016).

Yarbrough *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada geniş alan yüksek kalite WS₂ ince filmleri RF saçtırtma tekniği kullanılarak 350°C alt tabaka sıcaklığında silisyum üzerinde büyütmüşlerdir. XRD sonuçları, filmlerin kristal yapıya sahip olduğunu göstermiştir. FESEM (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri ile yüzey morfolojisinin filmlerin kalınlığını ve büyüme sıcaklığını kontrol ederek kolayca değiştirilebileceği gösterilmiştir (Şekil 7a). İlginç bir şekilde, düzlemsel filmlerin yavaş yavaş film kalınlığının artması ile nano yapıya dönüştüğü AFM sonuçlarıyla gözlemlenmiştir. Sıcaklığa bağlı I–V eğrisi, filmlerin saf yarıiletken olduğunu ve numunenin direncinin artan sıcaklıkla azaldığını göstermiştir (Yarbrough *et al.* 2019).

Huang *et al.* (2016) MoS₂ filmi saçtırtma yöntemi ile farklı sürelerde kaplanmış daha sonra sülfür tozları ile büyütme sonrası ısıtma işlemi uygulanmıştır (Huang *et al.* 2016). Bu çalışmada MoS₂ filmlerinde 20 cm²'nin üzerinde büyüme alanı sağlanmış ve katman katman büyümenin kontrol edilebilirliği gösterilmiştir. Katmanlı MoS₂'nin yüksek kristallliği Raman, foto-lüminesans (PL) ve transmisyon elektron mikroskopi (TEM) analizleri ile gösterilmiştir. Kaplama sıcaklığı ve tavlama ortamının film kalitesinde önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Şekil 7c'de MoS₂ filmini kanal olarak kullanan üst geçit alan etkili transistör, yaklaşık 10⁴ akım açma/kapama oranına sahip tipik n-tipi karakteristik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7. a) 100 nm kalınlığında WS₂ numunesinin FESEM görüntüsü. b) WS₂ filmi ve silikon alttaşı gösteren FESEM görüntüsü (Yarbrough *et al.* 2019) c) İki katmanlı (genişlik/uzunluk= 80 µm/30 µm) ve beş katmanlı (genişlik/uzunluk=100 µm/50 µm) MoS₂ kanallı üst kapı FET'lerin transfer karakteristikleri içinde: üretilen cihazın optik mikroskopi görüntüsü (Huang *et al.* 2016)

Yapılan literatür araştırması kapsamında grafenden sonra elektronik ve optoelektronik uygulamalar için gelecek vaat eden 2B malzemeleri entegre devreler ve düz panel ekranlar için uniform, geniş alanlı, sürekli ve yüksek kaliteli kontrol edilebilir kalınlıklarda üretmenin oldukça önem arz ettiği görülmüştür.

Tez Çalışmasının Özgünlüğü ve Literatüre Katkısı

Bu çalışma kapsamında TMDC ailesine ait olan WS₂ ve MoS₂ RFMS yöntemi kullanılarak sürekli film olarak büyük alan, istenilen kalınlıkta hızlı, uygun maliyetli ve kolay bir şekilde üretilmesi hedeflenmiştir. Raman, Raman Haritalama, XPS, XRD, SEM, AFM ve optik mikroskop görüntüleri kullanılarak üretilen filmlerin fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. RFMS yöntemi ile tek adımda büyütülen WS₂ ve MoS₂ ince filmleri üzerine yine tek adım litografi ile FET gerçekleştirilmiştir. Tek adımda büyütülen MoS₂ ve WS₂ filmler ile kabul edilebilir FET performansları elde edilmiştir. Alttaş olarak kullanılan silisyum yerine gözenekli silisyum kullanılarak bu çalışma kapsamında gözenekli silisyumun FET performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında RFMS yöntemi kullanılarak alttaş saçtırtma cihazından çıkarılmadan elde edilen MoS₂/WS₂ heteroyapı üzerine FET ilk defa üretilmiştir ve kabul edilebilir aygıt performansları elde

edilmiştir. TMDC malzemeler ile üretilen aygıtların önünde en büyük engel olan büyük alan film büyütmesine çözüm olarak sunulan bu çalışmada, elde edilen sürekli filmler ile üretilen aygıtlar ile entegre seviyesinde üretimin mümkün olabileceği gösterilmiştir.

Tez Çalışması İle Ulaşılan Hedefler

TMDC tabanlı aygıtları laboratuvar çalışmalarından endüstriyel devre seviyesinde uygulamalara taşıyabilmek amacıyla RFMS yöntemiyle;

1. Farklı kalınlıklarda WS₂ film büyütülmesi
2. Üretilen farklı kalınlıklardaki WS₂ filmlerden FET üretimi
3. Farklı kalınlıklarda MoS₂ film büyütülmesi
4. Üretilen farklı kalınlıklardaki MoS₂ filmlerden FET üretimi
5. MoS₂/WS₂ heteroyapısının büyütülmesi
6. MoS₂/WS₂ heteroyapı temelli FET üretimi
7. WS₂/Gözenekli silisyum temelli FET üretimi
8. WS₂/p-Si p-n eklem üretimi

KURAMSAL TEMELLER

Bu çalışmada Mo ve W'ye dayalı yarıiletken TMDC'ler tercih edilip bunların büyük alan ve sürekli film olarak saçırtma tekniği ile büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Tek bir proses adımı ile büyütülen farklı kalınlıklarda ki MoS₂ ve WS₂ filmler ile aşağıda anlatılan arka kapı FET ve p-n eklem uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Alttaş olarak kullanılan silisyum yerine gözenekli silisyum kullanılarak FET uygulamaları da çalışılmıştır. Ayrıca MoS₂ ve WS₂ filmler üst üste büyütülerek sürekli ve uniform heteroyapı elde edilmiştir.

Bu amaçla bu bölümde, 2B malzemeler (grafen-TMDC), transistörler ve FET karakterizasyonu başlıklar altında anlatılmıştır. Ayrıca farklı FET konfigürasyonlarına sahip çalışmalar, mobilite ve açma/kapama oranını iyileştirmek için yapılan kontak direnci düşürme yöntemleri ile ilgili çalışmalar, katkılama ile ilgili çalışmalar, TMDC malzemelerden yapılan FET'lerin ambipolar davranış gösterdiği çalışmalar, p-n eklemler, heteroeklem FET ile ilgili çalışmalar ve gözenekli silisyum ile bu alanda yapılan çalışmalara ait gerekli kısa bilgiler ve literatür araştırması yapılmış; yine bu bölümde başlıklar altında anlatılmıştır.

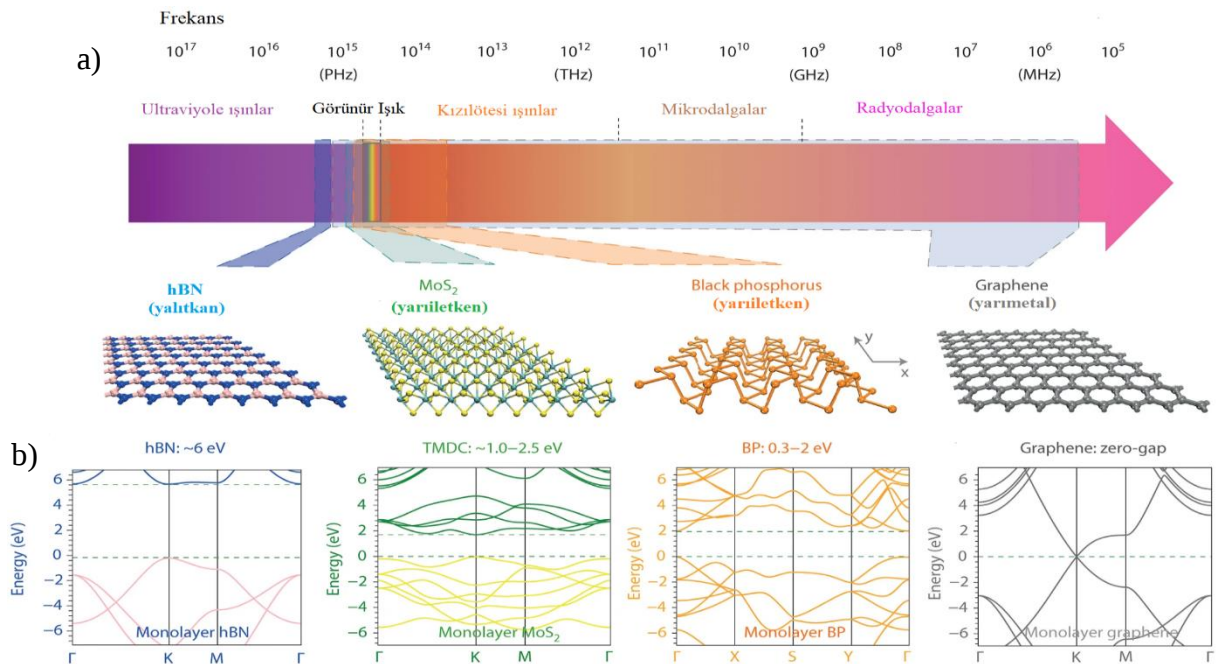
İki Boyutlu Malzemeler: Grafen-TMDC

Grafen, altıgen bir kafes içinde düzenlenmiş tek bir karbon atomu katmanı veya grafitin bir atomik katmanıdır. İlk 2B malzeme olarak Geim and Novoselov (2004) tarafından grafen çalışılmış ve bu çalışmaları ile Fizik Nobel Ödülü'nü kazanmışlardır (Novoselov *et al.* 2004). Grafen yüksek taşıyıcı mobilitesi, mekanik esneklik ve optik geçirgenlik gibi birçok üstün özelliği ile dikkat çekmiştir (Novoselov *et al.* 2005; Geim and Novoselov 2010). Grafen geniş alan esnek elektronik (Akinwande *et al.* 2014) ve güneş pilleri (Singh and Nalwa 2015) için çok uygundur, çünkü geniş dalga boylarının geniş aralığına karşı % 90'ın üzerinde optik şeffaflığa ve yüksek taşıyıcı mobilitesine sahiptir, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ elektron yoğunluğunda mobilitesi $200,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 'yi aşmaktadır (Novoselov *et al.* 2012).

Grafen Ailesi	Grafen	h-bN 'beyaz grafen'	BCN	Fluorografen	Grafen oksit
2B Kalkojenler	MoS ₂ , WS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂	Yarıiletken Dikalkojenler: MoTe ₂ , WTe ₂ , ZrS ₂ , ZrSe ₂		Metalik Dikalkojenler: NbSe ₂ , NbS ₂ , TaS ₂ , TiS ₂ , NiSe ₂	
				Tabakalı yarıiletkenler: GaSe, GaTe, InSe, Bi ₂ Se ₃	
2B Oksitler	Micas, BSCCO	MoO ₃ , WO ₃	Perovskite-tip: LaNn ₂ O ₇ , (Ca,Sr) ₂ Nb ₃ O ₁₀ , Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂ , Ca ₂ Ta ₂ TiO ₁₀		Hydroxides: Ni(OH) ₂ , Eu(OH) ₂
	Tabakalı Cu oksitler	TiO ₂ , MnO ₂ , V ₂ O ₅ , TaO ₃ , RuO ₂			Diğerleri

Şekil 8. 2B malzeme ailesi (Geim and Grigorieva 2013)

Bununla birlikte, grafen sıfır bant aralığına sahip bir malzemedir ve bir yarı metal olarak kabul edilir. Akım tamamen kapatılamadığı için açma ve kapama gereken dijital elektronik için grafenin uygun olmadığı görülmüştür (Schwierz 2010). Yüksek taşıyıcı mobilitesi ve yüksek şeffaflık gibi avantajlarına rağmen, dijital elektronik ve ışık yayan cihazlar gibi yarıiletken bant aralığının gerekli olduğu uygulamalarda sınırlı kullanıma sahiptir. Grafendeki bu eksiklik, Şekil 8'de verildiği gibi özellikle black phosphorus (BP), WS₂, MoS₂ gibi TMDC ve h-bN'de dâhil olmak üzere diğer katmanlı malzemeler araştırmacıların artan ilgisini görmeye başlamıştır (Chhowalla *et al.* 2013). 2B malzemelerin Şekil 9'da gösterilen çeşitli elektronik özellikleri ve bant aralığı yapıları nedeniyle birçok optik özellik sergiledikleri gözlemlenmiştir.

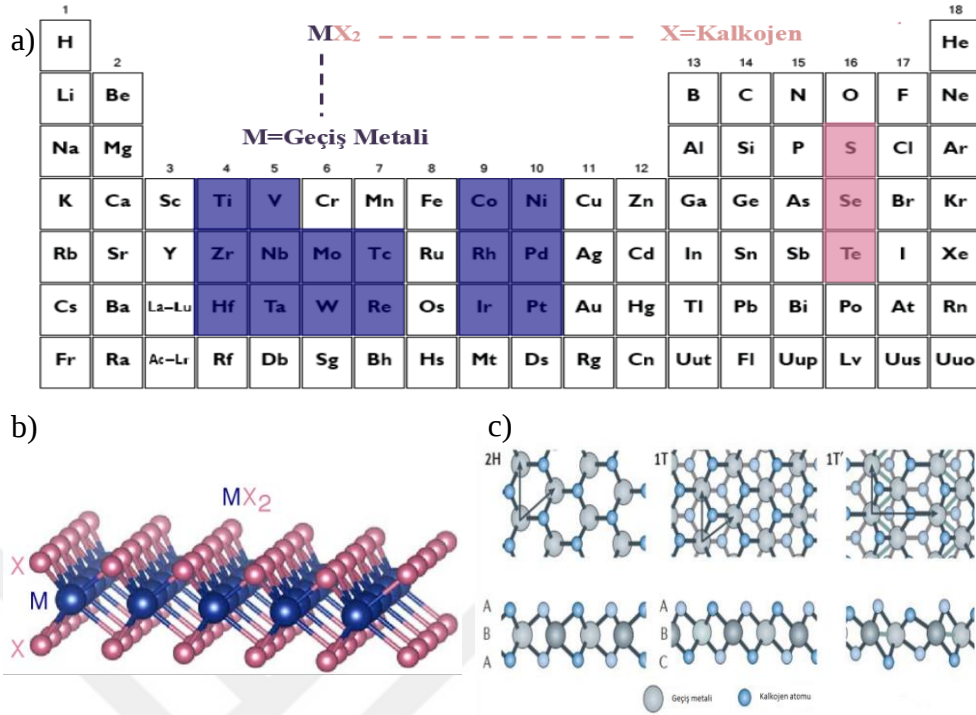


Şekil 9. a) UV'den radyodalgaya kadar 2B malzemelerin foto yanıtları: Soldan sağa doğru h-bN, TMDC, BP ve grafenin elektromanyetik spektrumları ve atomik yapıları b) bant yapıları (Xia *et al.* 2014)

TMDC'lerin özellikleri

MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 ve WSe_2 ilginç elektronik ve optik özelliklerinden dolayı en çok çalışılan TMDC ailesi üyeleridir. TMDC'ler MX_2 (M: Geçiş metali, X: Kalkojen atomu) genel formuna sahiptirler (Wilson and Yoffe 1969). Bir geçiş metali tabakasından (Mo, W, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Tc, Pd, Pt ve Re) ve iki kalkojen tabakasından (S, Se ve Te) oluşan sandviç yapı şeklinde bulunan 2B TMDC'ler, vdW etkileşimleri ile bir arada tutulan tabakalı malzemelerdir. Bilinen tüm katmanlı van der Waals katılarının kapsamlı bir listesi, yapılan bazı çalışmalarda bildirilmiştir (Wang *et al.* 2012; Butler *et al.* 2013; Chhowalla *et al.* 2013; Geim and Grigorieva 2013; Huang *et al.* 2013; Nicolosi *et al.* 2013). Yığın veya birkaç katman durumunda TMDC'ler 0,9-1,6 eV aralığında dolaylı bant aralıklarına sahiptir (Guo and Robertson 2016). Ancak, bu TMDC'ler tek tabakaya doğru indikçe, dolaylı bant aralığından, bant aralığı 0,9-2,5 eV aralığında olacak şekilde doğrudan bant aralığına geçiş sağlarlar. Birçok çalışma, yarıiletken TMDC'lerin kalınlığı tek bir katmana doğru azaldıkça, Gama point-noktasında dolaylı bir bant aralığından; Brillouin bölgesinin K-noktasında doğrudan bir bant aralığına geçişi öngörmüş ve doğrulamıştır. Özellikle, yığın MoS_2 , 1,2 eV dolaylı bir bant aralığına sahipken, tek katmanlı MoS_2 1,9 eV ile doğrudan bant boşluğuna sahiptir (Kuc *et al.* 2011). WS_2 için değişen bant aralığı geçişi 0,9 eV'dan 2 eV'a doğrudur. Doğrudan bant aralığı geçiş için benzer kanıtlar tek katmanlı MoSe_2 ve WSe_2 için de bildirilmiştir (Tongay *et al.* 2012; Zhao *et al.* 2013). Şekil 10a'daki grup 4-7 TMDC'ler ağırlıklı olarak tabakalı yapıda, 8-10 grup TMDC'ler genel olarak tabakasız yapıda bulunurlar. Tabakalı TMDC'lerin yapısı grafeninkine benzer, her bir katman 6-7 Å kalınlığında ve güçlü düzlem içi kovalent bağlarına ve zayıf düzlem dışı vdW bağlarına sahiptir (Podberezskaya *et al.* 2001). MX_2 katmanları arasındaki zayıf vdW bağları mekanik veya kimyasal ayrılma yoluyla TMDC'lerin yığın halden tek katmana kolayca ayrılmasını sağlamaktadır. TMDC'lerin tek tabakası, altıgen sıralı iki kalkojen atomu düzlemi arasına yerleştirilmiş altıgen sıralı bir metal atomu düzlemi olarak oluşur. Yığın TMDC'ler, katmanların istifleme sırasına bağlı olarak çeşitli yapısal politiplerde bulunurken, tek tabaka TMDC'ler, kalkojenin X-M-X yapısındaki metal elementin konumuna bağlı olarak iki politipte bulunur (Şekil 10b). Prizmatik (D_{3h} nokta grubu, petek motifi) veya oktahedral (D_{3d} nokta grubu, ortalanmış petek motifi) olmak üzere iki farklı koordinat sistemi mevcuttur. Şekil 10c'de görüldüğü üzere TMDC'lerin tek tabakalı fazları, sırasıyla 2H (tek tabakalı için 1H), 1T ve 1T' olarak adlandırılan 3 farklı fazı bulunmaktadır. 1T fazı doğada bulunmamaktadır ayrıca 1T fazı metastabildir ve ısıtma 2H fazına dönüşme eğilimindedir. Aynı zamanda 1T fazından 2H fazına dönüşüm, TMDC'nin elektronik yapısının metalik durumdan yarıiletken duruma dönüşümü demektir. Şekilde mor renk geçiş metalini (M) gösterirken pembe renk kalkojen atomunu (X)

göstermektedir (Chhowalla *et al.* 2013). Özellikle MoS_2 ve WS_2 için 2H fazı 1T ve 1T' fazlarından daha stabildir.



Şekil 10. a) TMDC'lerin MX_2 formunu oluşturan muhtemel kombinasyonları sunan periyodik elemanlar tablosu b) Oktahedral koordinasyon gösteren altıgen bir yapı TMDC'nin çizimi X-M-X sandviç yapısını oluşturan birim (c) Tek katmanlı TMDC'lerin kesit görünümü (1H ve 1T) (Ngankeu 2017)

Tablo 2'de özetlendiği gibi TMDC ailesine ait bileşikler, politip ve geçiş metali d-elektronlarının sayısına bağlı olarak metalik, yarı metalik, yarıiletken, süper iletken gibi çok çeşitli elektriksel özellikler sergilerler. TMDC'lerin bu üstün özellikleri elektronik ve optoelektronik uygulamalarda birçok avantaj sunmuştur. Orbitaler kısmen doldurulduğunda, 2H-NbSe₂ ve 1T-ReS₂ durumunda olduğu gibi, TMDC'ler metalik iletkenlik gösterir. Orbitaler 1T-HfS₂, 2H-MoS₂ ve 1T-PtS₂ gibi tamamen dolu olduğunda, malzemeler yarıiletkenlerdir. Kalkojen atomlarının elektronik yapı üzerindeki etkisi metal atomlarınıninkine kıyasla küçüktür.

Tablo 2. TMDC'lerin elektronik yapıları

Grup	M	X	Özellik
4	Ti, Hf, Zr	S, Se, Te	Yarıiletken ($E_g = 0.2 \sim 2$ eV) Diyamanyetik.
5	V, Nb, Ta	S, Se, Te	Dar bant metalleri ($\rho \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) veya yarımetaller. Süperiletken, paramanyetik, antiferromanyetik veya diyamanyetik
6	Mo, W	S, Se, Te	Sülfidler ve selenitler yarıiletken ($E_g \sim 1$ eV). Tellürler semimetaliktir ($\rho \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$). Diyamanyetik.
7	Tc, Re	S, Se, Te	Küçük boşluklu yarıiletkenler. Diyamanyetik.
10	Pd, Pt	S, Se, Te	Sülfidler ve selenitler yarıiletken ($E_g = 0.4$ eV) ve diyamanyetik. Telluritler metalik ve paramanyetikdir. PdTe ₂ süper iletken.

Özetle TMDC malzemeleri elektronik ve optoelektronik uygulamalar için önemli yapan özellikleri sıralayacak olursak;

- Bekleme durumunda düşük güç tüketimine sebep olan yüksek açma/kapama oranı
- Değişebilen bant aralığı (0,9-2.5 eV)
- Yüksek taşıyıcı mobilitesi
- Yüksek termal iletkenlik
- Küçük aygıtlarda kısa kanal etkilerini azaltması
- Düşük kontak direnci

Alan etkili transistörler için en önemli özelliklerden biri olan taşıyıcı mobilitesi TMDC malzeme ile birlikte değişken başka şartlara da bağlıdır. Bunlar; katman sayısı, lokal tuzak durumları, yük kirlilikleri, yük polaritesi, kontakların durumu, aygıt geometrisi, ölçüm şartları ve üretim kaynaklı kusurlardır (Chhowalla *et al.* 2016). MoS₂ ve WS₂ tabanlı aygıtlarda yukarıda sayılan nedenlerden dolayı 0,003-200 cm²/Vs aralığında değişen çok farklı mobilite değerleri elde edilmiştir.

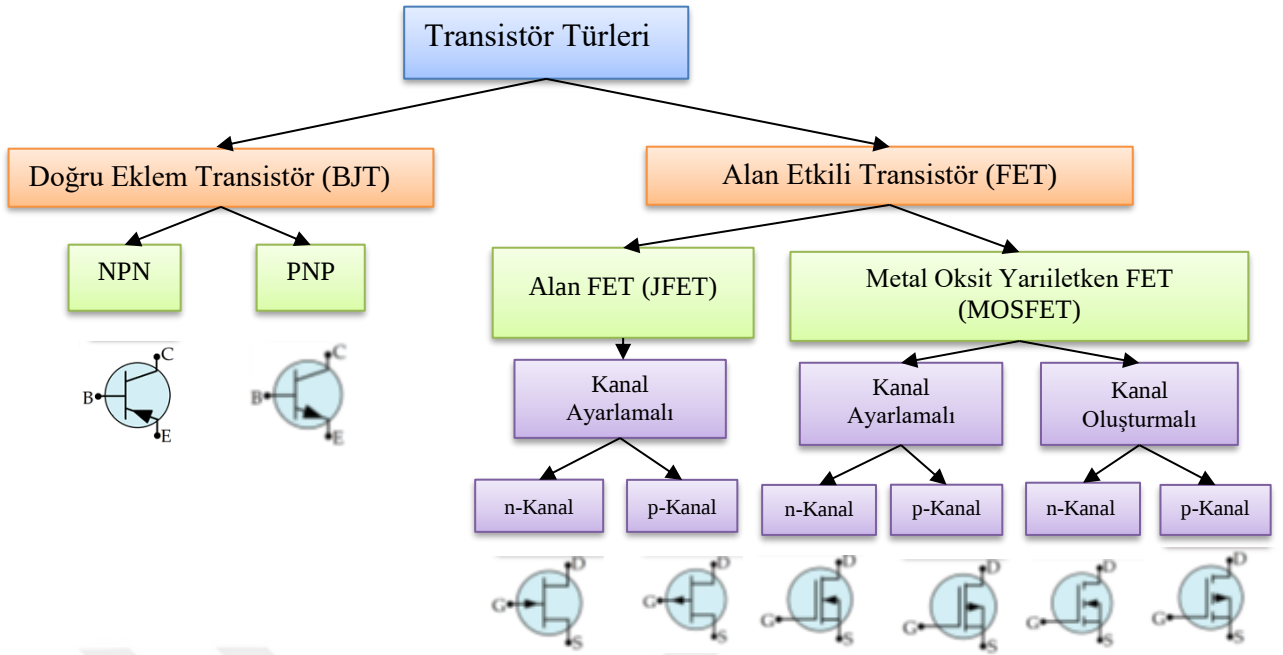
Transistörler

Transistörü 1947’de geliştirilen ABD’li mühendisler John Bardeen ve Walter H. Brattain bu buluşları sebebiyle 1956 yılında Nobel Fizik ödülünü paylaşmışlardır.

Boolean mantığına göre doğru “1” veya yanlış “0” a karşılık gelen iki durum mevcuttur. Dijital elektronik devreler, Boolean mantık fonksiyonlarının elektronik uygulamaları olan mantık kapılarının birleştirilmesinden oluşur. Her mantık geçidi genel olarak birkaç transistörden oluşur, bu durum transistörü modern dijital elektroniğin temel bileşeni yapar. Çoğu dijital elektronik devrede MOSFET temel bileşen olarak kullanılır. Yukarıda açıklanan iki ayrı voltaj durumu, bir MOSFET için iki farklı iletkenlik durumu (açık-kapalı) olarak ifade edilir.

MOSFET’ler için oldukça önemli olan yüksek açma/kapama akım oranı bant aralığı 1 eV’den büyük bant aralıklarına sahip yarıiletken malzemeler kullanılarak oda sıcaklığında elde edilebilir. Yarıiletken TMDC’lerde var olan bant aralığı sayesinde bant aralığı olmayan grafenden farklı olarak yüksek açma/kapama oranları elde edilebilir ve dolayısıyla 2B malzemelere dayalı dijital elektronik oldukça önemli bir konu olmuştur.

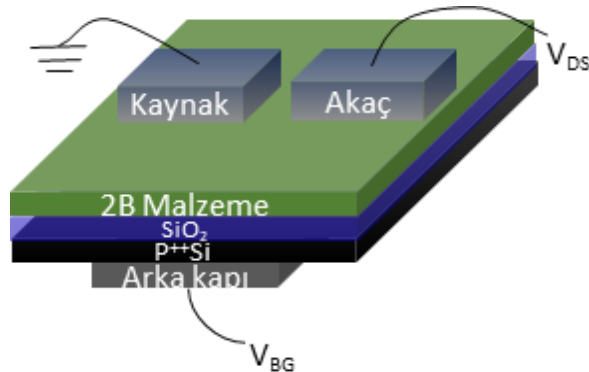
Şekil 11’de görüldüğü gibi birçok transistör türü olmasına rağmen, iki ana kategori olarak bipolar eklem transistörleri ve alan etkili transistörler olarak ayrılır.



Şekil 11. Transistör çeşitleri ve şematik gösterimleri

BJT; emiter, taban ve kollektör olmak üzere üç terminali olan akım kontrolü ile çalışan ve PNP veya NPN formunda oluşan ve yaygın olarak kullanılan transistör türlerindendir. BJT'ler günümüzde çoğunlukla yüksek iletkenlik ve çıkış direnci nedeniyle yüksek frekansta akım amplifikatörü olarak kullanılmaktadır.

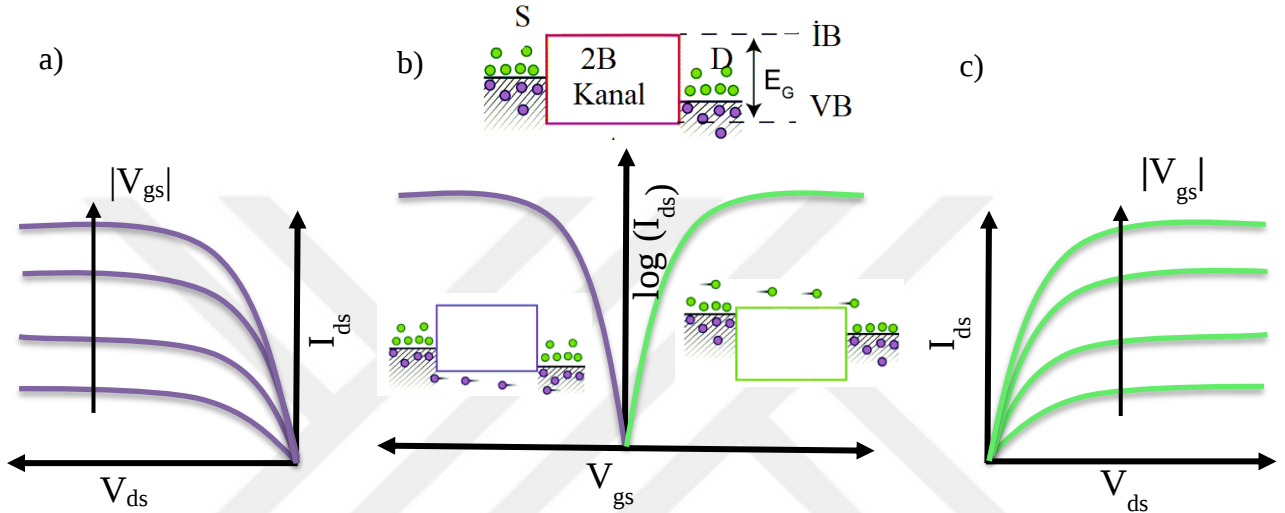
Bu transistörler, çoğunlukla geçmiş yüzyılın en başarılı malzemesi olarak kabul edilen silikondan üretilirler. Kararlı bir oksit oluşturması ve çok bulunan bir element olarak üretimi ucuzlaştırması silikonun tercih edilme nedenleri arasındadır. Ayrıca silikonun düşük dolaylı bant aralığı, nispeten yüksek delik hareketliliği ve katkılanarak ayarlanabilen elektrik ve mekanik özellikleri; silikonun entegre devrelerde ve fotovoltaiiklerde en yaygın malzeme haline gelmesine neden olmuştur.



Şekil 12. TMDC yarıiletken kanalına sahip arka kapı MOSFET'in şematik gösterimi

Bir MOSFET, kaynak ve akaç elektrotları arasındaki yarıiletkenin iletkenliğini kontrol etmek için bir kapı elektrot potansiyeli (V_{BG}) kullanarak bir elektrik anahtarı olarak çalışır.

MOSFET yapısında genellikle kaynak ve akaç elektrotları simetrik yapıdadır. Kutuplama yönüne göre akaç ve kaynak birbirleri yerine kullanılabilir. En sık kullanılan 2B MOSFET yapısı Şekil 12’de gösterilmektedir. Arka kapı (back-gate) MOSFET’te genellikle katkılı iletken bir alttaş üzerine 20-300 nm SiO_2 büyütülür. 2B malzeme ya alttaş üzerine transfer edilerek ya da doğrudan büyütülerek elde edilir. Kontak metali genel olarak 2B malzemenin üzerindedir. MOSFET, kaynak kontağı topraklanarak ve akaça V_{DS} gerilimi uygulanarak çalıştırılır. Aygıttan geçen akım arka kapıya V_{BG} voltajı uygulanarak modüle edilir. Bu gerilim bazen V_{GS} olarak da adlandırılır.



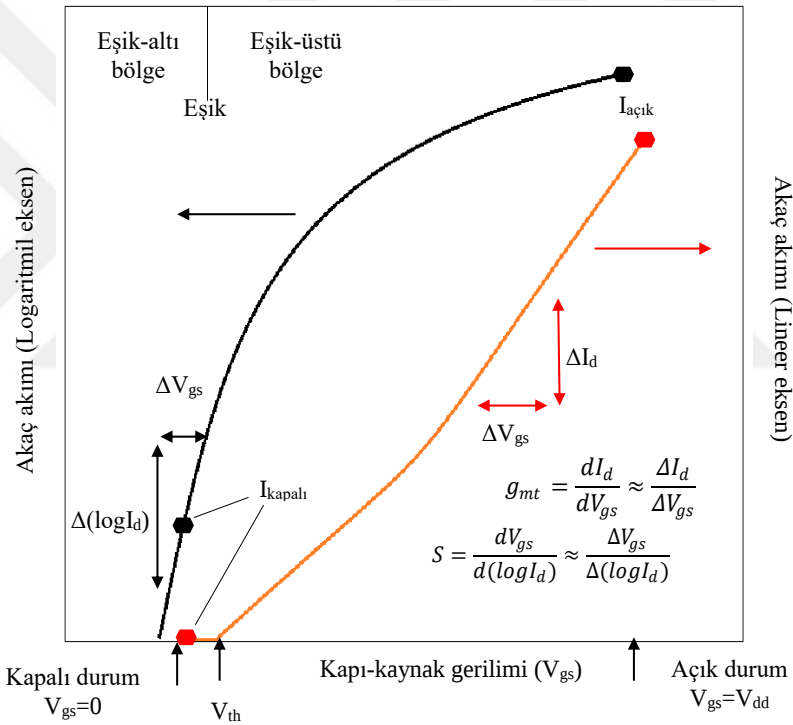
Şekil 13. İdeal 2B FET transistör karakteristiği gösterilmektedir. a) p-tipi çıkış karakteristiği b) 2B FET transfer karakteristiği (şeklin içinde uygulanan kapı voltajı (V_{gs}) ile değişen iletim bandı (İB) ve valans bandı (VB) gösterilmektedir c) n-tipi çıkış karakteristiği (Schulman *et al.* 2018)

Şekil 13a deşik (p-tipi) çıkış karakteristiğini (I_{ds} 'ye karşı V_{ds}), Şekil 13b ideal 2B FET transfer karakteristikleri (V_{gs} 'ye karşı I_{ds}) ve Şekil 13c elektron (n-tipi) çıkış karakteristiğini (I_{ds} 'ye karşı V_{ds}) göstermektedir. Kapı gerilimi olmadan ($V_{gs}=0$), Fermi tarafından kontrol edilen büyük termal bariyerler nedeniyle aygıt kapalı durumdadır. Şekil 13b'nin içerisindeki bant diyagramı kullanılarak şematik olarak gösterildiği gibi hem iletkenlik bandına (İB) elektronların enjeksiyonu hem de değerlik bandına (VB) deşikler için dağıtım mevcuttur. Bu nedenle, 2B kanal yüksek dirençlidir ve herhangi bir akım akışını önler. Kapıya pozitif bir voltaj uygulandığında, yani $V_{gs} > 0$ olduğunda, yüzey potansiyeline eşit $q\Psi_s$ tarafından 2B kanaldaki enerji bantları aşağıya doğru yer değiştirir. Burada q , elektronik yük ve Ψ_s , kanal yüzey potansiyelidir. Bu elektronların kaynaktan 2B kanaldaki iletim bandına enjeksiyonunu sağlar ve Şekil 13b'nin iç kısmında bant diyagramının sağ tarafında görüldüğü gibi akım akmaya başlar. Bu termiyonik elektronik akım, başlangıçta bant hareketinin neredeyse durduğu yerde eşik voltajına ($V_{gs}=V_T$) ulaşılan kadar artan V_{gs} büyüklüğü ile katlanarak artar. Benzer şekilde, kapıya negatif bir voltaj uygulandığında, yani $V_{gs} < 0$ olduğunda, 2B kanaldaki enerji bantları yukarı doğru yer değiştirerek akaçtan valans bandına deşik enjeksiyonuna izin verir, bu durum

Şekil 13b'nin iç kısımda bant diyagramı sol tarafında şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca deşik akımı açık durumu gelene kadar artan V_{gs} büyüklüğü ile katlanarak artar. Transfer karakteristiğinde transistör hem elektron hem de deşik akımı için çalıştığından dolayı transistör ambipolar MOSFET olarak adlandırılır.

Çeşitli TMDC MOSFET Aygıt Karakterizasyonu

Şekil 14 tipik bir n tipi transistörün V_{gs} göre I_{ds} eğrisini göstermektedir. Datalar ile lineer skalada (kırmızı eğri) ve logaritmik skalada (siyah eğri) çizilmiştir. Nano ölçekli FET'ler karşılaştırılırken temel aygıt ölçekler başlıca: aldeşik eğimi (SS), kontak direnci (R_c), alan etkili mobilite (μ), açma-kapama akım oranı ($I_{açma}/I_{kapama}$), eşik voltajı (V_{th}) ve kısa kanal etkilerinin varlığıdır. FET'lerin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için V_{th} ve mobilite değerlerinin doğru bir şekilde çıkarılması önem arz etmektedir (Chang *et al.* 2014).



Şekil 14. Kapı geriliminin (V_{gs}) bir fonksiyonu olarak akaç akımı (Schwierz 2010)

Açma/Kapama oranı ($I_{açma}/I_{kapama}$)

Bu oran maksimum akım modülasyonu olarak adlandırılan ve üretilen aygıtın güç tüketimi ve lojik devre performansı hakkında bilgi veren önemli bir parametredir. Bu oran açma akımı ($I_{açma}$) doyum bölgesindeki maksimum akım, kapama akımı (I_{kapama}) ise kesim bölgesindeki minimum akım seçilmek üzere logaritmik eksen I_{ds} - V_{ds} eğrisinden hesaplanır. Bu değer transistörün iyi anahtarlama karakteristiğine sahip olması gerektiğinden yüksek değerde olması istenmektedir.

Taşıyıcı mobilitesi (μ)

Taşıyıcı mobilitesi, uygulanan elektrik alan başına ortalama yük taşıyıcı hızı olarak ifade edilir. Taşıyıcı mobilitesi (μ) lineer I_{ds} - V_{gs} eğrisinin doğrusal olarak değiştiği bölgenin eğiminden transconductance (transfer iletkenliği (g_m)) çıkarılarak denklem 1-2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{L}{W \times V_{ds} \times C_i} \times \frac{dI_{ds}}{dV_{gs}} \quad (2)$$

Burada;

L: Kanal uzunluğu (1 μ m, 2 μ m, 4 μ m, 8 μ m, 16 μ m, 32 μ m, 64 μ m)

W: Kanal genişliği (150 μ m)

Ci: SiO₂ dielektrik kapasitansı; $C_i = (\epsilon_0 \times \epsilon_r)/d = 1.15 \times 10^{-8}$ F/cm²

ϵ_0 : vakum için dielektrik sabiti

ϵ_r : SiO₂'nin bağıl dielektrik sabiti

d: Yalıtım tabakası SiO₂'nin kalınlığı; d: 300 nm

V_{ds} : Akaç-kaynak gerilimi

Alteşik salınımı (Subthreshold Swing, (SS))

Kapı voltajı V_{th} eşik voltajına ulaşmadan önce akım logaritmik ölçekte V_{gs} ile katlanarak artar ve alteşik eğimi olarak bilinir. Alteşik eğiminin tersi genellikle birimi (mV/decade) olarak verilen alteşik salınımı (SS) olarak adlandırılır. Ölçekli bir MOSFET SS değeri 300 K'de yaklaşık 70 mV/decade, bu da eşik altı akaç akımını on kat artırmak için geçit voltajında 70 mV'lık bir artış gerektiği anlamına gelir. $I_{açma}/I_{kapama}$ oranını düşürdüğü ve aygıt boşa iken güç tüketimini düşürdüğü için küçük SS istenir. Transfer eğrisi kullanılarak 3 nolu denklem kullanılarak hesaplanır.

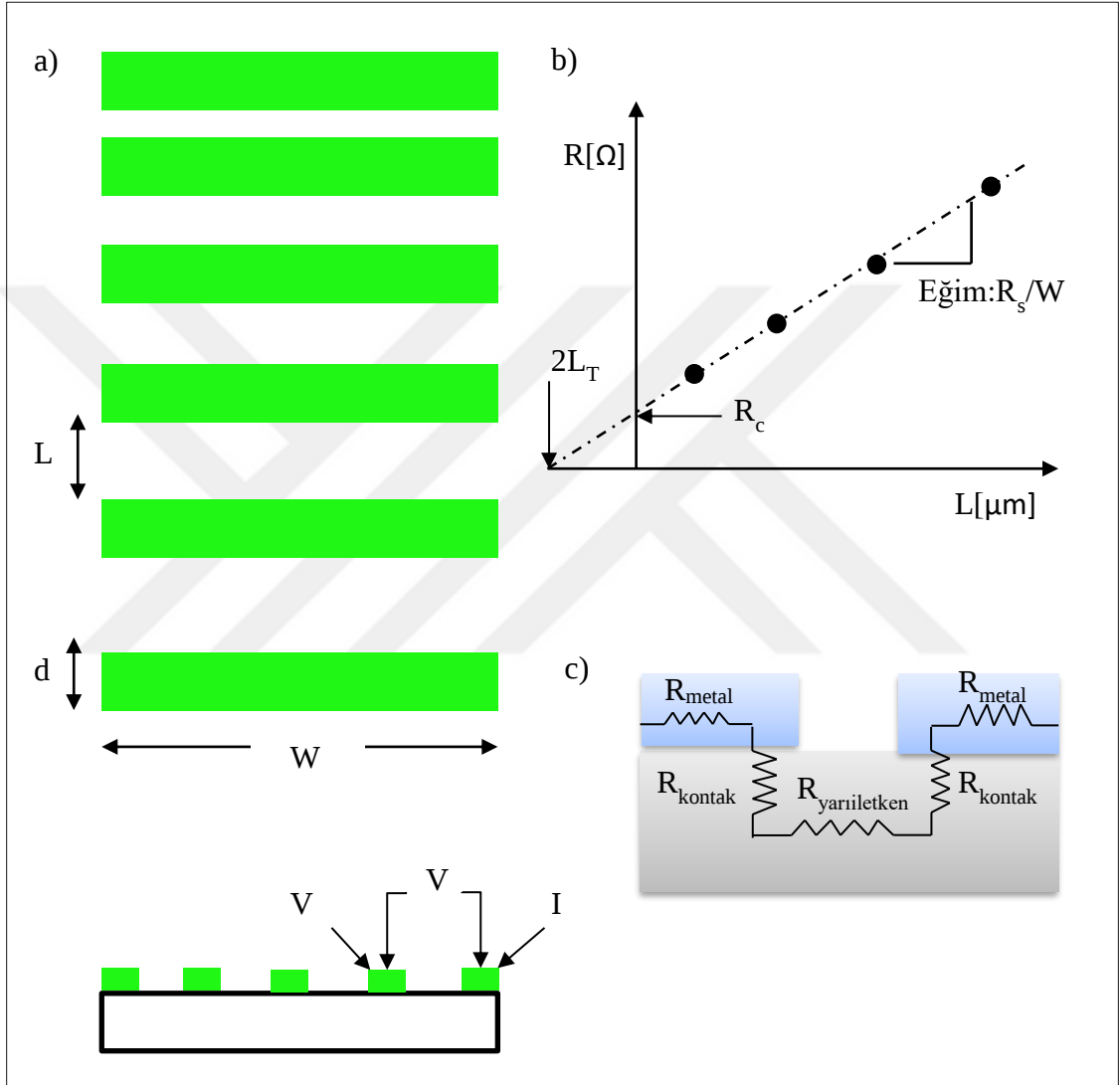
$$SS = \ln 10 \frac{dV_{gs}}{d(\ln I_{ds})} \quad (3)$$

Eşik gerilimi (V_{th})

V_{th} hesaplanabilmesi için I_{ds} - V_{gs} eğrisi kullanılır. I_{ds} - V_{gs} eğrisinin pozitif tarafında lineer eksplorasyon yapılarak V_{th} çıkarılır.

Kontak Direnci Ölçüm Yöntemi: TLM (İletim Hattı Modeli)

TLM yöntemi, yapılan aygıtlarda ki kontak kalitesini belirlemek için oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. TLM yöntemi kullanılarak aygıtlarda ki tabaka direnci (R_s), kontak direnci (R_c) ve özgül kontak direnci (özdirenç (ρ_c)) hesaplanabilmektedir. Bu model aralarında farklı mesafeler bulunan (L) metal kontaktların direncinin ölçülmesine dayanmaktadır. Direnç ölçüm sisteminden ölçülebilir veya ölçüm sistemi ile I-V eğrisi çıkartılıp direnç hesaplanabilir.



Şekil 15. TLM ölçüm yapısı a) TLM kontak bölgeleri ve ölçüm sistemi b) farklı kontak boşluklarına göre direnç grafiği c) yapı üzerinde bulunan direnç bölgeleri

Kontak direnci hesabının nasıl yapıldığını gösterebilmek için kontaktlar arasında ki mesafeye bağlı direnç eğrisi Şekil 15’de verilmiştir. Bu grafik kullanılarak fit işlemi uygulanırsa grafiğin eğiminden R_s/W değeri, kontaktlar arası mesafenin 0 olduğu noktanın düşey eksenini kestiği eksen değerinden de $2R_c$ hesaplanır. Transfer uzunluğu L_T 4-7 nolu denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$R_C = \frac{pc}{L_T W} = \frac{R_S L_T}{W} \quad (4)$$

$$R_T = R_{yariletken} + 2R_C \quad (5)$$

$$R_T = \frac{R_S L}{W} + 2 \frac{R_S L_T}{W} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{R_S}{W} (L + 2L_T) \quad (7)$$

Kontak öz direnci (pc)(Ωcm^2), tabaka direnci ile transfer uzunluğunun çarpımı olarak 8 nolu denklem ile hesaplanır.

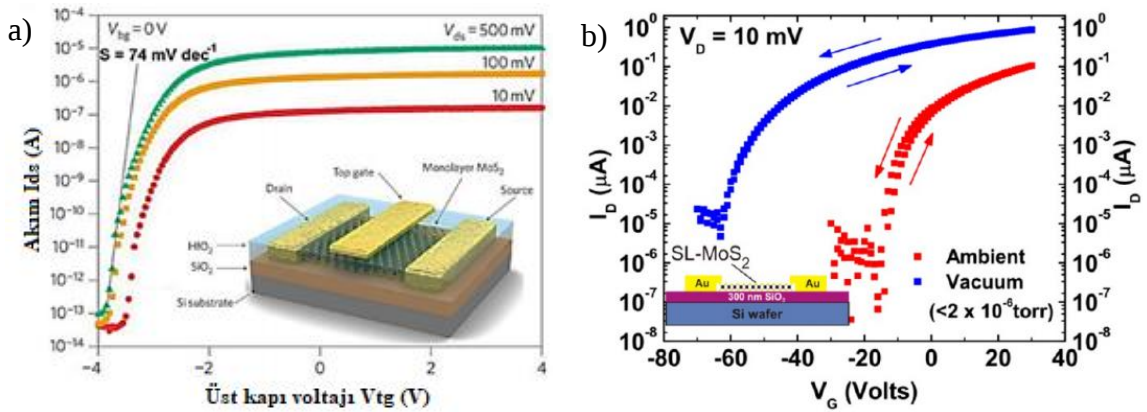
$$pc = R_S * (L_T)^2 \quad (8)$$

Farklı Fet Konfigürasyonları İle İlgili Yapılan Çalışmalar

MOSFET'ler üst kapı ve arka kapı konfigürasyonu olarak iki şekilde üretilebilmektedir. Aşağıda ki literatürde farklı konfigürasyonlarda yapılmış MOSFET'lerin performansları verilmiştir.

Arka kapı konfigürasyonuna sahip çok katmanlı MoS₂ FET gerçekleştirilmiş, ancak FET'ler oldukça düşük mobiliteler (0,1-40 cm²/Vs) göstermiştir (Novoselov *et al.* 2005; Ayari *et al.* 2007). Yapılan literatür araştırmasına göre, çok katmanlı MoS₂'nin mobilitesi, yığın halde bulunan MoS₂'ye göre oldukça düşük ve (100 ile 260 cm²/Vs) arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Fivaz and Mooser 1967). Daha sonra, yüksek-k dielektrikler (50 nm kalınlığında Al₂O₃) kullanılarak, arka kapı konfigürasyonuna sahip çok katmanlı MoS₂'ye dayalı FET'ler nispeten yüksek mobiliteler (>100 cm²/Vs) ve açma/kapama oranı (10⁶) göstermiştir (Kim *et al.* 2012). Bu aygıtın kanal genişliği 4 µm ve kanal uzunluğu 7 µm dir. 30 nm kalınlığında çok katmanlı MoS₂, 50 nm kalınlığında bir Al₂O₃ tabakası ile kaplanmış silikon alttaş üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca, Schottky kontaklara sahip ve Al₂O₃ oksit tabakasına (15 nm kalınlığında) sahip arka kapı konfigürasyonuna sahip FET'lerin oda sıcaklığında 700 cm²/Vs'e kadar yüksek mobiliteler gösterdiği görülmüştür (Das *et al.* 2012). Çok katmanlı (20 katman) MoS₂ FET'lerin mobilitelerinin, aynı üst kapılı yapılarındaki tek katmanlı MoS₂ FET (Radisavljevic *et al.* 2011) ile karşılaştırıldığında daha küçük bant aralığından (dolayısıyla daha küçük Schottky bariyeri) dolayı mobilitelerinin 500 cm²/Vs'i aştığını göstermişlerdir (Liu and Ye 2012). Şekil 16a'da FET yapısı gösterilen diğer bir çalışmada tek tabaka MoS₂ kullanılarak üst kapılı FET üretilmiştir, oda sıcaklığında alınan ölçümlerde 10⁸ gibi yüksek açma/kapama oranı ve 74 mV/dec SS değeri gözlemlenmiştir (Radisavljevic *et al.* 2011). Bu çalışmada aynı zamanda üst dielektrik varlığının taşıyıcı hareketliliğini artırdığı öne sürülmüştür. Ultra ince TMDC'lerde taşıyıcı mobilitesi yarıiletken filmin iki tarafındaki

arayüze de bağlıdır. Bu etki Şekil 16b’de de görüldüğü gibi vakum altında ve oda şartlarında ölçümleri alınıp karşılaştırılan çalışmada görülmüştür (Jariwala et al. 2013). Bu tez çalışmasında üretiminin kolay olmasından dolayı arka kapı FET tercih edilmiştir.



Şekil 16. a) Tek tabaka MoS₂ tabanlı üst kapı konfigürasyonuna sahip FET’in yarı logaritmik transfer karakteristiği (Radisavljevic *et al.* 2011) b) Atmosfer şartlarında (kırmızı) ve vakum altında (mavi) ölçülen kapsüllenmemiş alt kapı tek tabaka MoS₂ FET’in transfer eğrileri, atmosferik etkilerin cihaz performansı üzerinde olumsuz etkileri olduğunu gösterilmektedir. Şeklin içinde aygıt şematik resmi görülmektedir (Jariwala *et al.* 2013).

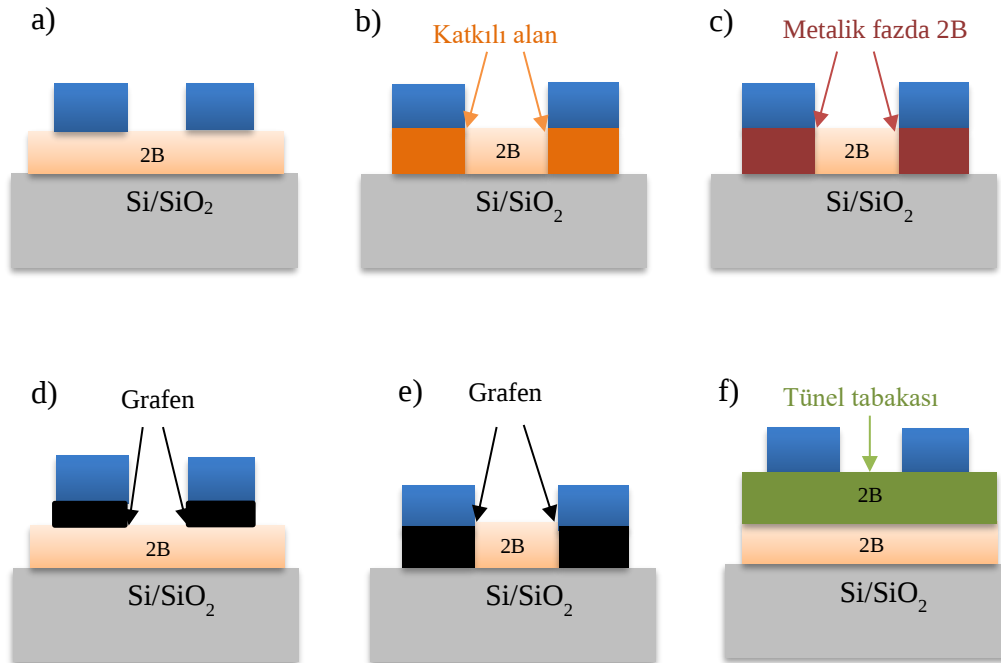
FET Performanslarını İyileştirmek İçin Yapılan Çalışmalar

2B cihazların uygun ve öngörülebilir kullanımını sağlamak için temel cihaz metriklerinin anlaşılması ve kontrolü gerekmektedir. Cihaz performansını etkileyen konular dört ana kategoride sınıflandırılabilir: kanal malzemelerinin kalitesi, metal kontaklar, arayüzey etkileri ve kısa kanal etkileri. Bu sorunların birçoğu geleneksel yığın yarıiletken cihazlarda gözlemlense de, bu sorunların cihaz performansı üzerindeki etkisi beklenmektedir. Örneğin, bir 2B FET’teki elektronlar geçit dielektrik ve alttaş arayüzlerine yakın olarak sınırlandığından, arayüzey saçılımının etkileri, geleneksel yığın yarıiletkenlerden yapılan FET’lere kıyasla daha fazladır. Ayrıca, 2B FET’ler ile geleneksel FET’ler arasındaki yapı ve üretim süreçleri bakımından bazı farklılıklar vardır. Örneğin, çoğu 2B FET’de kaynak/akaç metal kontağı 2B yarıiletkenle doğrudan temas eder. Öte yandan, geleneksel FET’lerde metal temasından önce yüksek katkılı kaynak/akaç bölgeleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak, 2B FET’lerle ilgili önemli sorunları anlar ve çözersek, optimize edilmiş cihaz performansı elde edilebilir (Liu *et al.* 2017). Aşağıda verilen literatürde, 2B elektronik ile ilgili karşılaşılan engeller ve çözümleri verilmiştir. Malzeme kalitesi, homojenlik, büyük alan büyüme ve ölçeklenebilirlik 2B cihazların çalışmasını etkileyen en önemli etkidir. Aşağıda, 2B cihaz elektrik kontak çeşitleri ve kontakların nasıl iyileştirildiği tartışılmıştır. Çoğu 2B cihazdaki yüksek temas direnci, cihaz doğrusallığını etkiler ve cihaz akımını ciddi şekilde azaltır. Bu nedenle, temas direncini azaltmak için yeni tekniklerin kullanılması 2B elektronik cihazların geleceği için oldukça

önemlidir. 2B cihazların çalışmasını etkileyen farklı etkilerin teorik olarak öngörülen değerlerine yaklaşmasını önlediği görülmüştür. Saçılmadan ve arayüzey tuzaklarından kaynaklanan istenmeyen etkileri anlamak ve azaltmak için yapılan son araştırmalar verilmiştir.

2B Yarı İletkenlerde Elektrik Kontaklar

Kontak, özellikle kısa kanallı aygıtlar olmak üzere birçok elektronik ve optoelektronik aygıt uygulamaları için önemli bir konudur. Kısa kanallı aygıtlarda, kontak direncinin aygıt direncine katkısı, nispeten uzun kanallı aygıtlara kıyasla daha fazladır. Bu nedenle, 2B yarıiletkenlerle düşük dirençli kontakların oluşturulması önemlidir. Ancak, aşağıdaki nedenlerden dolayı 2B yarıiletkenlerle iyi kontak sağlamak oldukça zordur. İlk olarak, 2B malzemelerin yüzeyinde açık bağ bulunmadığından bu malzemelerin metaller ile güçlü arayüzey bağları yapması zorlaşır ve dolayısıyla kontak direncinin artmasına sebep olur. Kontak direncini azaltmak için Silisyum ve III-V grubu yarıiletkenler için uygulanan katkılama yöntemi 2B yarıiletkenler için kullanılması zordur. Çünkü ultra ince 2B yarıiletken yapısından dolayı 2B yarıiletken kanalların özelliklerini, katkılama değiştirebilmektedir. Üçüncüsü, özellikle küçük boyutlu cihazlarda 2B yarıiletkenler ve kontak elektrotları arasındaki kontak alanları genellikle küçüktür, bu da büyük kontak direncine sebep olur. Son birkaç yılda, Şekil 17’de verildiği gibi araştırmacılar 2B yarıiletkendeki kontakları iyileştirmeye yönelik çeşitli stratejiler geliştirmişlerdir. Aşağıda ki paragrafta bu konuyla ilgili literatür verilmiştir.



Şekil 17. 2B yarıiletken FET'lerde elektrik kontaklarını iyileştirmek için kullanılan yöntemler: a) Temas metalleri ve prosesi değiştirmek. b) Kontak alanlarını katkılamak. c) 1T-2H faz mühendisliğinde düzlem içi heteroeklemler d) Grafen üst kontağı e) Grafen kontağı f) 2B yarıiletkenler ve kontak elektrotlar arasına tünel tabakası eklemek (Liu *et al.* 2017).

Şekil 17a, kanal malzemesi olarak 2B yarıiletkenlerin kullanıldığı kaynak ve akaç olmak üzere iki kontak elektrotun bulunduğu arka kapılı FET'in yapısını göstermektedir. Metal yarıiletken bağlantılarındaki kontak doğası (Omik veya Schottky) ve Schottky bariyer yüksekliğinin, kontak metali iş fonksiyonu (ϕ_{Metal}) ve yarıiletkenin elektron afinitesi (χ) tarafından belirlenir. Bu prensibe dayanarak, farklı iş fonksiyonlarına sahip metaller kullanarak metal yarıiletken kontak kontrol edilebilmiştir (Das *et al.* 2012; Das and Appenzeller 2013; Chuang *et al.* 2014).

Örneğin, Das *et al.* (2012) çok katmanlı MoS₂ ile farklı iş fonksiyonlarına sahip dört çeşit metal arasındaki temasları incelemiş ve Schottky bariyer yüksekliklerinin kullanılan metallerin çalışma fonksiyonları ile ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Sc, Ti, Ni ve Pd gibi dört metal arasında Sc'nin 3.5 eV'luk en düşük iş fonksiyonuna sahip ve MoS₂ ile en küçük Schottky bariyer yüksekliğini oluşturduğu ve Sc kontaklı MoS₂ aygıtların bu dört kontak metali ile yapılan aygıtlar arasında en iyi performansı gösterdiği görülmüştür.

Farklı iş fonksiyonlarına sahip metaller seçilerek, metalin Fermi enerji seviyesini yarıiletkenlerin iletim veya valans bantlarına hizalayarak n-kanallı FET veya p-kanallı FET yapılabilir. Örneğin MoS₂ genellikle n tipi bir yarıiletkendir; fakat kontak olarak çok yüksek iş fonksiyonuna sahip MoO_x kullanılırsa MoS₂ p-tipi FET özelliği gösterdiği görülmüştür (Chuang *et al.* 2014). WSe₂ transistörlerin polaritesi, Pd gibi yüksek iş fonksiyonuna sahip metaller veya Au, Ti gibi nispeten düşük iş fonksiyonlu metaller kullanılarak kolayca p-tipi veya ambipolar olarak değiştirilmiştir (Liu *et al.* 2016). Metal türlerini değiştirmeye ek olarak işlem parametreleri TMDC aygıtlarda kontak özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, English *et al.* (2016), Au-elektrot biriktirme sırasında vakumunu 10⁻⁶ Torr'dan 10⁻⁹ Torr'a yükselterek, Au-kontaga sahip birkaç katman MoS₂'den oluşan aygıtlarda 740 $\Omega\mu\text{m}$ gibi üç kat daha düşük kontak direncinin (R_c) elde edilebileceğini ortaya koymuştur (English *et al.* 2016). Kontak direnci, TLM yöntemine göre ölçülmüş ve cihazların dört ay boyunca stabil cevaplar verdiği belirlenmiştir. Yazarlar, yüksek vakumlu işlemin Au ve MoS₂ arasında daha temiz bir arayüz sağlayabileceğine ve bunun da R_c 'yi azaltacağına ve cihaz performansını artıracığı kanaatine varmışlardır. Cihaz imalatından sonra, vakumda veya inert bir ortamda tavlama sonrası adımın, cihaz performansını ve stabilitesini artırmak için rutin olarak kullanıldığı iyi bilinmektedir (Radisavljevic *et al.* 2011). Genel olarak, tavlama adımı metal elektrotlar ve yarıiletkenler arasında daha mükemmel bir arayüz oluşturulmasına engel olan arayüzey kirleticisi maddelerini (rezist kalıntıları gibi) uzaklaştırır. R_c 'yi azaltmak için ikinci yaklaşım Şekil 17b'de gösterildiği gibi kontak alanını katkılamaaktır. Örneğin, WSe₂ transistörleri potasyum veya NO₂ katkılararak açma akımını önemli ölçüde artırmışlardır (Fang

et al. 2012; Fang *et al.* 2013). Du *et al.* (2014) tarafından bir TMDC transistörünün klorür molekülleri veya amin açısından zengin kimyasallar gibi kimyasallar kullanılarak katıldığı da bildirilmiştir (Du *et al.* 2014). Bununla birlikte, bu kimyasal katkılama tekniklerinin katkı maddelerinin zaman içinde stabil olamaması gibi birkaç dezavantajı var olduğu görülmüştür.

Şekil 17c, TMDC transistörlerde düşük R_c teması elde etmek için başka bir yaklaşımı göstermektedir: TMDC'lerin farklı özelliklere sahip 1T ve 2H gibi farklı fazları vardır. Bu özellikten yararlanan Kappera *et al.* (2014) 1T ve 2H MoS₂ arasında düzlem içi bir heteroyapı üretmişlerdir. Daha sonra, kanal olarak 2H MoS₂ ve kontak olarak 1T MoS₂ kullanarak, 200-300 $\Omega\mu\text{m}$ 'lik düşük bir kontak direncine (R_c) MoS₂'ye dayalı transistörler üretmişlerdir (Kappera *et al.* 2014). Aynı yaklaşım, CVD ile büyütülmüş MoS₂ ve WSe₂ ile düşük kontak dirençli ve yüksek performanslı TMDC transistörlerinin elde edilmesinde de kullanılmıştır (Kappera *et al.* 2014; Ma *et al.* 2015). Kimyasal olarak katkılanmış kontak durumunda oluşan problemlere benzer şekilde, 1T-fazlı MoS₂ ve WSe₂ atmosfer şartlarında stabil değildir ve havaya maruz kalınca aygıt performansı düşmektedir. Bu dezavantaj, bu tür faz mühendisliğinin pratik uygulamalarını sınırlamalara sebep olmaktadır. Bu sorunu çözmek ve aygıtı kararlı yapmak için faz dönüşümünden hemen sonra havaya maruz bırakmayıp tüm cihazı kapsülleme gibi bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Grafen kullanmak 2B yarıiletkenlerle iyi kontak elde etmek için diğer bir etkili yaklaşımdır. İki çeşit grafen bazlı kontak vardır: üst kontak (Şekil 17d) ve kenar kontak (Şekil 17e). Grafen sıfır bant aralığına sahiptir ve Fermi seviyesi harici bir alan uygulanarak kolayca ayarlanabilir, bu da grafen ve farklı yarıiletkenler arasında mükemmel bir enerji bandı hizalamasına neden olur. Prensip olarak, grafenin Fermi seviyesini ayarlamak için yeterince yüksek bir potansiyel uygulanırsa grafen birçok yarıiletkenle omik kontak oluşturabilir. Liu *et al.* (2015) Grafen ile üst kontakları olan MoS₂ transistörleri üretmiştir. Bu transistörler, grafen ile birkaç katmanlı MoS₂ arasında gerçek engelsiz kontakların oluşumunu ile doğrusal bir I_{ds} - V_{ds} ilişkisi göstermişlerdir (Liu *et al.* 2015). Bu yaklaşımın dezavantajı, düşük dirençli kontaklar elde etmek için grafen ve 2B yarıiletkenler arasında yeterince büyük bir örtüşme gerektirmesidir. Bu tür yapılar arasındaki boşlukları ortadan kaldırmak için grafen ve 2B yarıiletkenler, Şekil 17e'de görüldüğü gibi kenar kontağı yaklaşımı gösterilmiştir (Lee *et al.* 2015). Guimarães *et al.* (2016) MOCVD ile büyütülmüş MoS₂ ve WS₂ ile grafen yanal eklemler üretmişlerdir (Guimarães *et al.* 2016). Bu çalışma ile küçük aygıt boyutları ve yonga boyutlarında düşük dirençli omik kontaklar gerçekleştirme yaklaşımının mümkün olduğu gösterilmiştir.

İyi kontak elde etmek için diğer bir yaklaşım 2B yarıiletkenler ve kontak metali arasında ince bir tünel tabakası oluşturmaktır. Wang *et al.* (2016) tarafından metal elektrotlar ve MoS₂ arasına tünel tabakası olarak CVD ile büyütülmüş h-bN kullanmışlardır (Wang *et al.* 2016). Tek tabakalı veya iki tabakalı h-bN kullanılarak tünel direncinde önemli bir artış olmadan Schottky bariyer büyük ölçüde azaltılmıştır. İnce bir h-bN tabakası oluşturulduktan sonra Schottky bariyer yüksekliği, 158 meV'dan 31 meV'a; kontak direnci 5,1 KΩμm'den 1,8 KΩμm'ye düşürülmüştür. Sonuç olarak, bu tür tünel kontaklarına sahip MoS₂ transistörleri, oda sıcaklığında 330 μAμm⁻¹ çıkış akımı ve 73 cm²/Vs mobilite göstermişlerdir. Bu değerler 77K'de 572 μAμm⁻¹ ve 321,4 cm²/Vs'ye yükseltilmiştir (Şekil 17f).

p-n Eklem

TMDC'lerin Si ve GaN (Galyum Nitrat) gibi 3B malzemeler ile entegrasyonu farklı uygulamalar için çeşitli imkânlar sunmaktadır. Örgü uyumu yarıiletkenlerin entegrasyonu için önem arz etmektedir. 2B ve 3B malzemelerden latis uyumsuzluğu olmadan dikey ve yanal heteroyapılar oluşturmak mümkün olmuştur. 2B/3B malzeme temelli heteroyapılar araştırmacıların çalıştığı konular arasına girmiştir.

MoS₂/Si heteroeklem temelli yapılar fotodedektör (Esmaili-Rad and Salahuddin 2013; Li *et al.* 2015) ve güneş pili (Hao *et al.* 2015) gibi fotonik aygıt uygulamalarında kullanılmıştır. Ayrıca MoS₂/GaAs, MoS₂/GaAs (Hao *et al.* 2017), MoS₂/InP (Lin *et al.* 2015), MoS₂/SiC (Lee *et al.* 2014) ve MoS₂/GaN heteroyapılarda (Lee *et al.* 2015; Tangi *et al.* 2016; Zhang *et al.* 2018) çeşitli aygıt uygulamalarında kullanılmıştır. Aftab *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada WS₂/Si p-n eklemi oluşturup doğrultma karakteristiği sergilediğini gözlemlemişlerdir (Aftab *et al.* 2017). Yukarıda ki çalışmalarda genel olarak mekanik ayırma ve CVD yöntemi kullanılarak filmlerden elde edilmiştir. Aygıtların ticarileşmesi açısından büyük alan ve sürekli film olarak büyütülmesi diğer aygıtlarda olduğu gibi p-n eklemlerde de önem arz etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında uygulanması basit, farklı alttaşlara büyütme yapmaya imkân sağlaması, tekrarlanabilir olması ve film kalınlığının kontrol edilebilir olmasından dolayı RFMS yöntemi ile Si üzerine WS₂ film büyütülüp p-n eklem oluşturulmuştur. Aygıt performansı araştırma ve bulgular bölümünde verilmiştir.

Gözenekli Silisyum (PS)

İlk olarak 1950'lerde Uhlir ve Turner tarafından rapor edilen gözenekli silisyum, teknolojiadaki kullanım alanlarından dolayı oldukça fazla ilgi çekmiştir (Uhlir Jr 1956; Turner 1958). Gözenekli silisyum nano boyutlu materyal topluluğuna çeşitli avantajlar sağlayan nano

yapılı bir malzemedir. Adından da anlaşılacağı gibi nano kristaller ve porlar içeren bir yapıdır. Gözenekli Si oda sıcaklığında yüksek yüzey/hacim oranı ($\sim 500 \text{ m}^2\text{cm}^{-3}$), yüksek yüzey reaktivitesi, lüminesans özellikleri gibi aygıt uygulamaları için avantaj sağlayan özelliklere sahiptir (Lehmann and Gösele 1991; Föll *et al.* 2002). Ayrıca silisyum ve gözenekli silisyum arasındaki heteroyapı diğer kristal silisyumlara göre yüksek enerji bant boşluğuna (1.8-2.2ev) sahiptir (Chen *et al.* 1994). Gözenekli Si geleneksel yığın silisyumunda bulunmayan birçok inert fiziksel ve kimyasal özellik sergiler. Gözenekli Si sağladığı üstün optoelektronik özellikler yüksek yüzey hacim oranı ve biyouyumluktan dolayı özellikle sensör, biyosensör uygulamalarında avantaj sağlamaktadır (Dhanekar and Jain 2013; RoyChaudhuri 2015; Al-Hardan *et al.* 2016) (Torres-Costa *et al.* 2005). Ayrıca güneş pili, fotodedektör, gözenekli Si Schottky diyot ve ledler gibi birçok optoelektronik uygulamada avantaj sağlamaktadır (Myong *et al.* 2004; Bourenane *et al.* 2007; Badawy 2008).

Araştırmacıların gözenekli silisyumun elektriksel özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalardan elektriksel iletkenliğin yüzey durumları tarafından sağlandığı görülmüştür (Gülnahar *et al.* 2015). Gözenekli Si düşük gözenekli durumda bile yarıyalıtkan elektriksel özellik sergilemektedir (Lehmann *et al.* 1995). Öte yandan gözenekli Si optik özellikleri üzerine birçok çalışma bulunmasına rağmen elektriksel özellikleri üzerine çalışmalar oldukça azdır, bu nedenle elektriksel özellikleri çok iyi bilinmemektedir (Mareš *et al.* 1993; Pulsford *et al.* 1994; Stievenard and Deresmes 1995; Ray *et al.* 1998). Stabil olmaması ve iyi bilinmeyen yapısı nedeniyle elektriksel özelliklerini ve iletim mekanizmasını derinlemesine bilmek oldukça zordur. Doğrultma davranışı metal ve gözenekli Si arasında var olan Schottky bariyerden kaynaklandığı öngörülmektedir (Dimitrov 1995; Remaki *et al.* 2003).

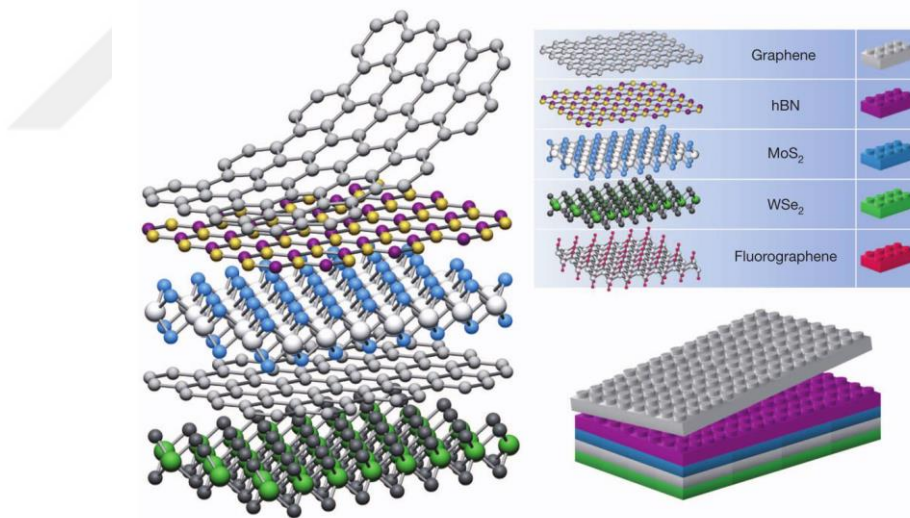
TMDC malzemelerin gözenekli silisyum ile birlikte kullanıldığı çalışmalar oldukça yenidir. Dwivedi *et al.* (2017) $\text{MoS}_2/\text{PSi}/\text{Si}$ yapısı oluşturarak etanol sensörü yapmışlardır, MoS_2 filmi iki adımlı proses ile ilk olarak Mo saçtırtma yöntemi ile geniş alan büyütülmüştür daha sonra sülfürleme ile film elde edilmiştir (Dwivedi *et al.* 2017). Başka bir çalışmada n- MoS_2/p -gözenekli silisyum heteroyapı temelli fotodedektör üretilmiştir. Düzlemsel silikon üzerine yapılan aygıttan daha iyi foto algılama performansı gösterdiği gözlemlenmiştir, bu durum yüksek arayüzey bariyer yüksekliği, üstün ışık tutma özelliği ve $\text{MoS}_2/\text{P-Si}$ arasında ki büyük birleşme alanından kaynaklandığı raporlanmıştır (Dhyani *et al.* 2017).

Yukarıda verilen literatür özeti ışığında gözenekli Si'nin TMDC malzemeler ile birlikte kullanıldığı çalışmanın oldukça az olduğu görülmüştür. Ayrıca TMDC malzemelerin gözenekli silisyum ile kafes uyumsuzluğu olmadan yapı oluşturabileceği düşünülmüştür. Çalışma kapsamında RFMS yöntemi ile geniş alan WS_2 ince film gözenekli silisyum üzerine

büyütülerek FET yapısı oluşturulmuştur. WS₂/Gözenekli Si temelli FET elektriksel karakterizasyonu sonuçları araştırma ve bulgular bölümünde verilmiştir.

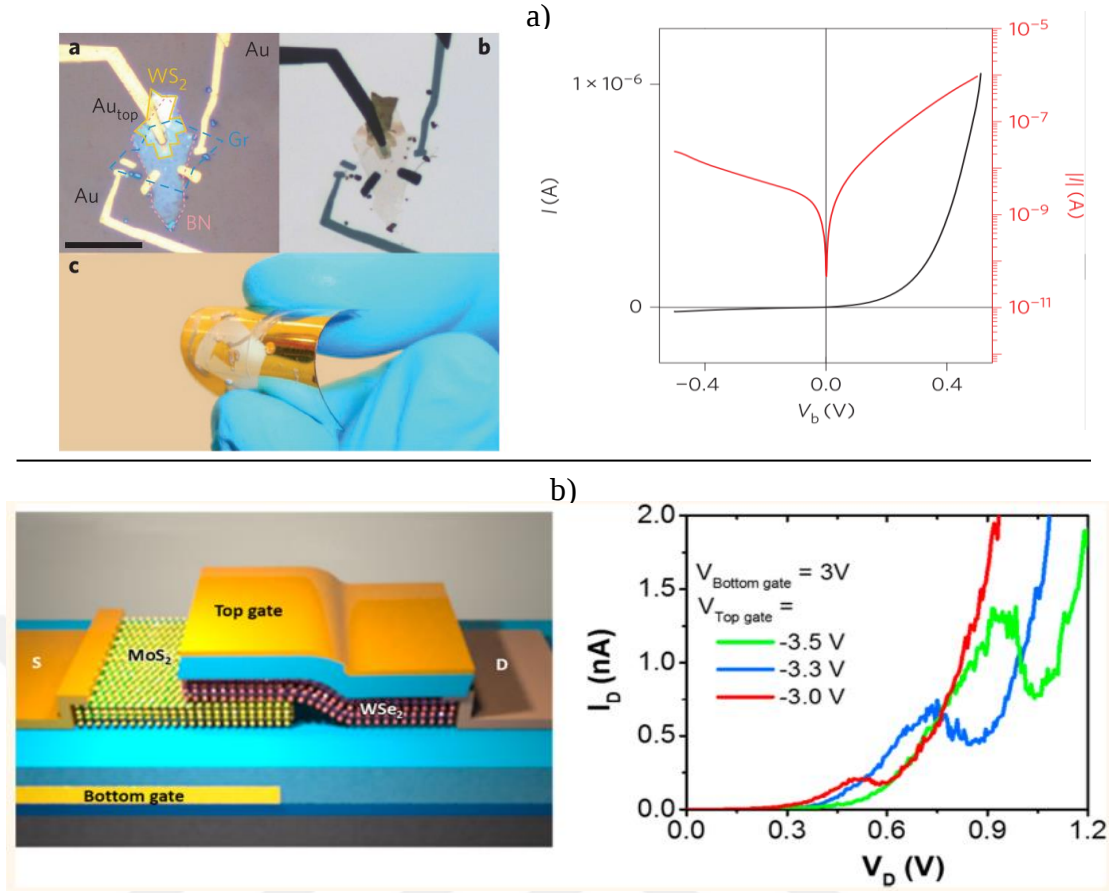
2B Heteroeklem Yapıları ve Uygulamaları

TMDC'lerin 1) zayıf vdW bağlarına sahip olması 2) atomik olarak eklemenin ince yapıda olması 3) yüzeyde bağlanmamış bağlar (dangling bonds) olmamasından dolayı örgü sabiti farklılıklarının neden olduğu kusurlar olmadan yüksek kalitede heteroeklem arayüzeyi oluşturması 4) ultra hızlı yük transferin önemli ölçüde zamansal tepkiyi artırması gibi nedenlerden dolayı heteroeklem veya heteroyapı tabanlı elektronik ve optoelektronik aygıtlar son zamanlarda araştırmacıların çalıştığı konular olmuştur (Geim and Grigorieva 2013; Novoselov *et al.* 2016). 2B malzemeler kullanılarak lego bloklarına benzer şekilde 2B heteroyapıların oluşturulması mümkündür (Şekil 18). Ayrıca, farklı çalışma fonksiyonları, bant aralıkları ve elektron afinitelerine sahip çeşitli 2B malzemeler kombine edilerek benzersiz elektriksel ve optik bağlantı özelliklerinin bulunması beklenmektedir. Bu nedenden dolayı transistörler bellek aygıtları, fotodetektörler, fotovoltaiik cihazlar ve ledler gibi çeşitli 2B heteroeklem tabanlı cihazlar çalışılmıştır.



Şekil 18. 2B kristalleri lego bloklarına benzer olarak düşünülerek 2B heteroyapıların inşaa edilmesi (Chiu 2018).

Transistör üretimi kapsamında, TMDC'ler TMDC/grafen, TMDC/h-bN veya TMDC/TMDC heteroyapılar şeklinde oluşabilmektedir (Geim and Grigorieva 2013); (Novoselov *et al.* 2016). Bu yapılar iki teknikle gerçekleştirilebilir: alttaş üzerine direk büyüme veya büyütülmüş filmi alttaş üzerine transfer yoluyla. Bu heteroyapılar dikey büyüme (WSe₂/SnS₂, MoS₂/WSe₂, WS₂/MoS₂, grafen/h-bN, vb.) (Gong *et al.* 2014; Yu *et al.* 2015; Qian *et al.* 2017; Yang *et al.* 2017) ve yanal büyüme (WS₂/WSe₂, WSe₂/MoS₂, WS₂/MoS₂ vb.) (Zhang *et al.* 2017) şeklinde oluşturularak güzel çalışmalar sunulmuştur.



Şekil 19. 2B heteroyapı temelli FET uygulamaları a) Grafen/WS₂ heteroyapı temelli FET ve V_b -J eğrisi (Britnell *et al.* 2012) b) Çift kapılı MoS₂/WSe₂ heteroyapısı ve V_D - I_D eğrisi (Roy *et al.* 2015)

Grafen FET'lerinin düşük açma/kapama oranı sorununu gidermek ve TMDC FET'lerde gerçekleştirilmesi zor olan aşırı düşük çalışma voltajında yüksek açma akımı yoğunluğu elde edememe problemlerini çözmek için, grafen ve TMDC içeren heteroyapılar öneri olarak sunulmuştur. Dikey olarak istiflenmiş cihazlarda grafen kullanımının, elektrik alanının heteroyapılara nüfuz etmesine izin verdiği gösterilmiştir. Şekil 19a'da verilen bu dikey heteroeklemler arayüzlerde Schottky bariyer yaratmıştır, izolatör (h-bN) tünellemesi yerine. TMDC'ler yarıiletken olarak işlev görmüş ve yüksek açma/kapama oranı ile birlikte büyük kanal akımı elde edilmiştir (Britnell *et al.* 2012). Roy *et al.* (2015) çift kapılı bir aygıt mimarisi kullanarak dikey MoS₂/WSe₂ vdW heteroyapılarında arayüzeyde banttan banda tünellemeyi deneysel olarak göstermişlerdir (Şekil 19b). Tablo 3'te özetlendiği gibi, 2012'den beri dikey Grafen/TMDC heteroyapıları üretilmiştir. Örneğin, dikey Gr/MoS₂ FET'leri, 10^5 'in üzerinde yüksek bir açma/kapama oranı ve 5×10^4 A/cm² açma akım yoğunluğu elde edilmiştir (Moriya *et al.* 2014).

Ayrıca, Gr/WS₂/Gr yapısına dayanan dikey FET yapısı üretilmiş ve oda sıcaklığında bile 10^6 açma/kapama oranı olduğu bildirilmiştir (Georgiou *et al.* 2013). Gr/WSe₂ tabanlı

FET'lerde düşük sıcaklıkta (180 K), son derece yüksek 5×10^7 açma/kapama oranı elde edildiği rapor edilmiştir (Shim *et al.* 2016). Yapılan başka bir çalışmada MoS₂ katmanını FET kanalı olarak ve grafen katmanını kaynak/akaç kontağı olarak tasarlanmıştır. Dikey heteroyapının karakteristiklerinden $\sim 10^6$ gibi yüksek akım açma/kapama oranı ve deşiklerin yük taşıma işine hâkim olduğu p-tipi davranış gözlemlenmiştir.(Roy *et al.* 2014).

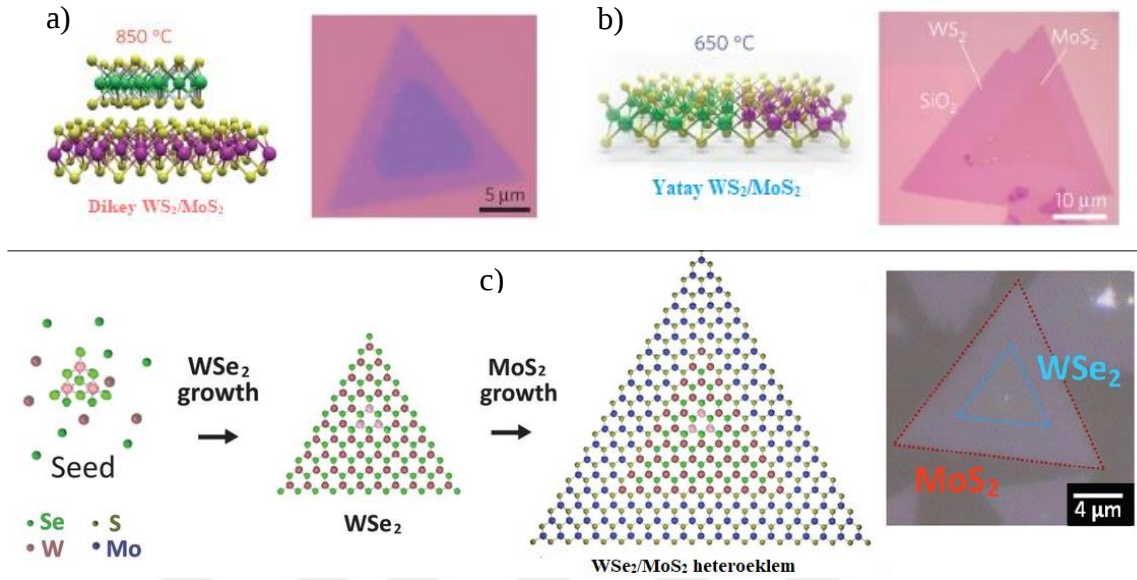
n-tipi yarıiletkenlerin aksine, MoTe₂ ve WSe₂ daha önceki literatürde bahsedildiği üzere p-tipi davranış gösterirler. MoS₂/WSe₂ dikey heteroyapılar p-n eklemi olarak çalıştığı rapor edilmiştir (Furchi *et al.* 2014). Tablo 3'te 2B heteroyapılara dayanan cihazların performansı özetlenmiştir.

Tablo 3. 2B heteroeklem tabanlı FET performansları (Lv and Lc 2019)

Malzeme	Yapı	Açma/Kapama Oranı	Elektron (e) ve Deşik (d) Mobilitesi (cm ² /Vs)	Referans
WSe ₂ /MoSe ₂	Yanal heteroeklem	10^5 - 10^6	-	(Sahoo <i>et al.</i> 2018)
WS ₂ /MoS ₂	-	-	-	(Sahoo <i>et al.</i> 2018)
WS ₂ /WSe ₂	Yanal heteroeklem	-	10-20(e) 30-100(d)	(Duan <i>et al.</i> 2014)
Grafen/WS ₂	Dikey heteroeklem	10^6	-	(Georgiou <i>et al.</i> 2013)
Grafen/MoS ₂	Dikey heteroeklem	$>10^6$	33(e)	(Roy <i>et al.</i> 2014)
Grafen/MoS ₂	Dikey heteroeklem	~ 100	600(e)	(Shih <i>et al.</i> 2014)
WSe ₂ /MoS ₂	Dikey heteroeklem	10^5	5,97(e) 0,54(d)	(Lee <i>et al.</i> 2016)
Gr/WSe ₂	Dikey heteroeklem	3×10^4 (300K) 5×10^7 (180K)	-	(Shim <i>et al.</i> 2016)
Gr/MoS ₂	Dikey heteroeklem	10^5	-	(Moriya <i>et al.</i> 2014)

CVD, büyük alan ve yüksek kalitede 2B heteroeklemlerin kontrol edilebilir kalınlıklarda ve tekrar edilebilir prosedürle üretilmesinde sıkça kullanılmıştır. Gong *et al.* (2014), hem dikey olarak (Şekil 20a) [C1] hem de yatay WS₂/MoS₂ heteroeklemlerin (Şekil 20b) tek adımlı bir CVD prosesi üretilmesini rapor etmiştir (Gong *et al.* 2014). Bu şekilde tek bir adım CVD sürecinde kalkojen ya da metal atomu olmak üzere sadece bir element değiştirilebilmektedir (Huang *et al.* 2014). Li *et al.* (2015) 2B yatay heteroeklem üretmek için Şekil 20c'de görüldüğü gibi iki adımlı sentez yöntemi uygulamışlardır. İki adım CVD yöntemi kullanarak tek tabaka n-tipi MoS₂ ve p-tipi WSe₂ ile p-n eklemi oluşturmuşlardır (Li *et al.* 2015). Zhang *et al.* (2016) çalışmalarında iki adımlı CVD yöntemi ile temiz arayüze sahip dikey MoS₂/WS₂ yapıyı oluşturmuşlardır (Zhang *et al.* 2016). Raman sonuçları incelendiğinde mekanik transfer ile oluşturulmuş heteroyapıda CVD yöntemi oluşturulmuş yapıya göre MoS₂ ve WS₂ için A_{1g} modunda 3-4 cm⁻¹ kayma görülmüştür. Bu çalışmada vdW etkileşim gücünü ve arayüzler arası

temas kalitesini belirleyebilmek için A_{1g} modu kullanılabileceği öngörülmüştür. Bu öngörü üzerinden CVD yöntemi ile oluşturulmuş heteroyapıda güçlü bir bağlantı olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.



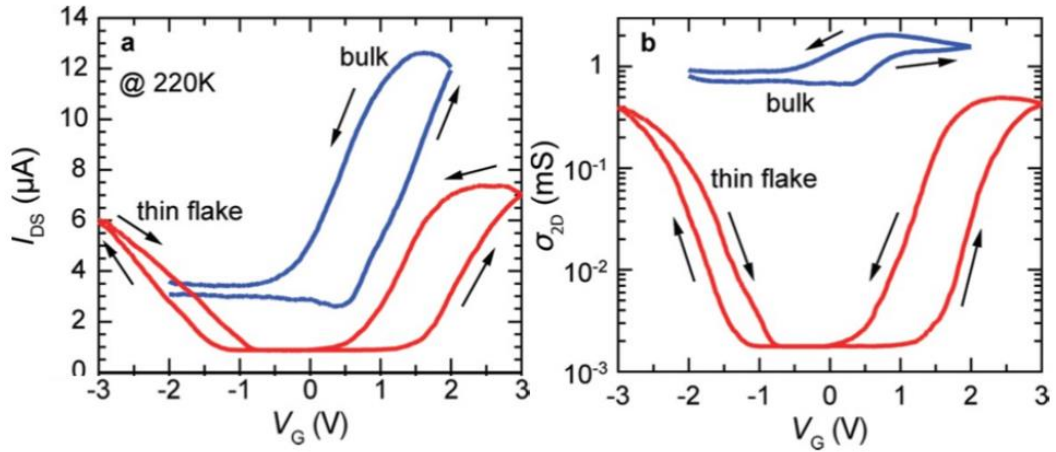
Şekil 20. TMDC heteroyapılar için CVD prosesi a) Dikey WS_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü b) Yatay WS_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü (Gong *et al.* 2014) c) WSe_2/MoS_2 heteroyapısının şematik gösterimi ve optik görüntüsü (Li *et al.* 2015)

Ambipolar Davranış Gösteren TMDC Tabanlı Transistörler

Anahtarlama karakteristiğine ve yarıiletkenler içindeki baskın yük taşıyıcılarına göre transistörlerin polaritesi tek kutuplu (unipolar) (deşik baskın p-tipi veya elektron-baskın n-tipi) veya çift kutuplu (ambipolar) (deşik ve elektron birlikte) olarak kategorize edilebilir. Ambipolar transistörler yarıiletken içinde elektron vedeşiklerin senkronize bir şekilde taşınmasına izin veren transistör türleridir (Van Berkel and Powell 1987)

Ambipolar transistörlerde p- ve n-tipi elektrik performansı tek bir cihazda görülmektedir. Bu nedenden dolayı organik kimya ve aygıt bilimi alanlarında araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Bisri *et al.* 2014). Geçmiş yıllarda organik küçük moleküller içeren yarıiletken malzemeler (Hwang *et al.* 2015), eşlenik polimerler (Ni *et al.* 2019), 2B malzemeler (Baugher *et al.* 2014) ve organik-inorganik hibrit malzemeler (Li *et al.* 2015) ambipolar yük aktarımı gerçekleştirmek için uygulamalarda kullanılmıştır. Her iki yükü de taşıyan ambipolar transistörler metal oksit yarıiletken invertörlerin yapımını daha da basitleştirirler. Ayrıca sinaptik aralıktaki nörotransmitterlerin taşınması ile yük taşıyıcılarını taşınması ve yakalanması arasında ki benzerlikten ilham alınan yapay sinaptik öyküleme ve nöromorfik hesaplamalar için ambipolar transistörler büyük öneme sahiptir (Li *et al.* 2015).

Ambipolar davranış, yüksek taşıyıcı yoğunluklarına ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) ulaşmak için kapı olarak iyonik sıvı kullanılan ince pul MoS₂'ye (10 nm) dayanan elektrikli çift katmanlı transistörlerde (EDLT'ler) gösterilmiştir (Zhang *et al.* 2012) (Şekil 21). Yığın ve ince MoS₂ aygıtların yük transfer eğrileri Şekil 21'de gösterilmektedir. Şekil 21'de görüldüğü üzere yığın MoS₂ aygıt unipolar özellik gösterirken, ince film MoS₂ aygıt ise ambipolar özellik göstermektedir. V_G negatif yöne döndüğünde, ince MoS₂'den yapılan EDLT'de -1V'da belirgin bir p-tipi taşınımının başladığı gözlenmiştir. Fakat yığın MoS₂ yapılan EDLT'de bu değişim gözlenmemiştir. Bu durum deşik taşınımının ince MoS₂'deki elektron taşınması ile benzer olduğunu göstermektedir. Hall etkisi ölçümleri ayrıca elektron ve deşik için sırasıyla 44 ve $86 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite gözlemlenmiştir. Deşik hareketliliği elektron hareketliliğinin iki katı değerindedir. Bu aygıtlardaki açma/kapama oranı >100 'dür, bu oran ince MoS₂'ye dayanan FET'lerde belirtilen orandan oldukça düşüktür (Radisavljevic *et al.* 2011).



Şekil 21. Yığın ($1000 \text{ nm} \times 500 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$) ve ince-pulcuk ($20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 15 \text{ nm}$) MoS₂ tabanlı EDLT'lerin transfer eğrileri gösterilmektedir. Kapı voltajının (V_G) bir fonksiyonu olarak kanal akımındaki (I_{DS}) değişimi ve kapı voltajının (V_G) bir fonksiyonu olarak tabaka iletkenliğinin (σ_{2D}) değişimi. Kanal gerilimi (V_{DS}) her iki cihaz için 0.2V'tur (Zhang *et al.* 2012).

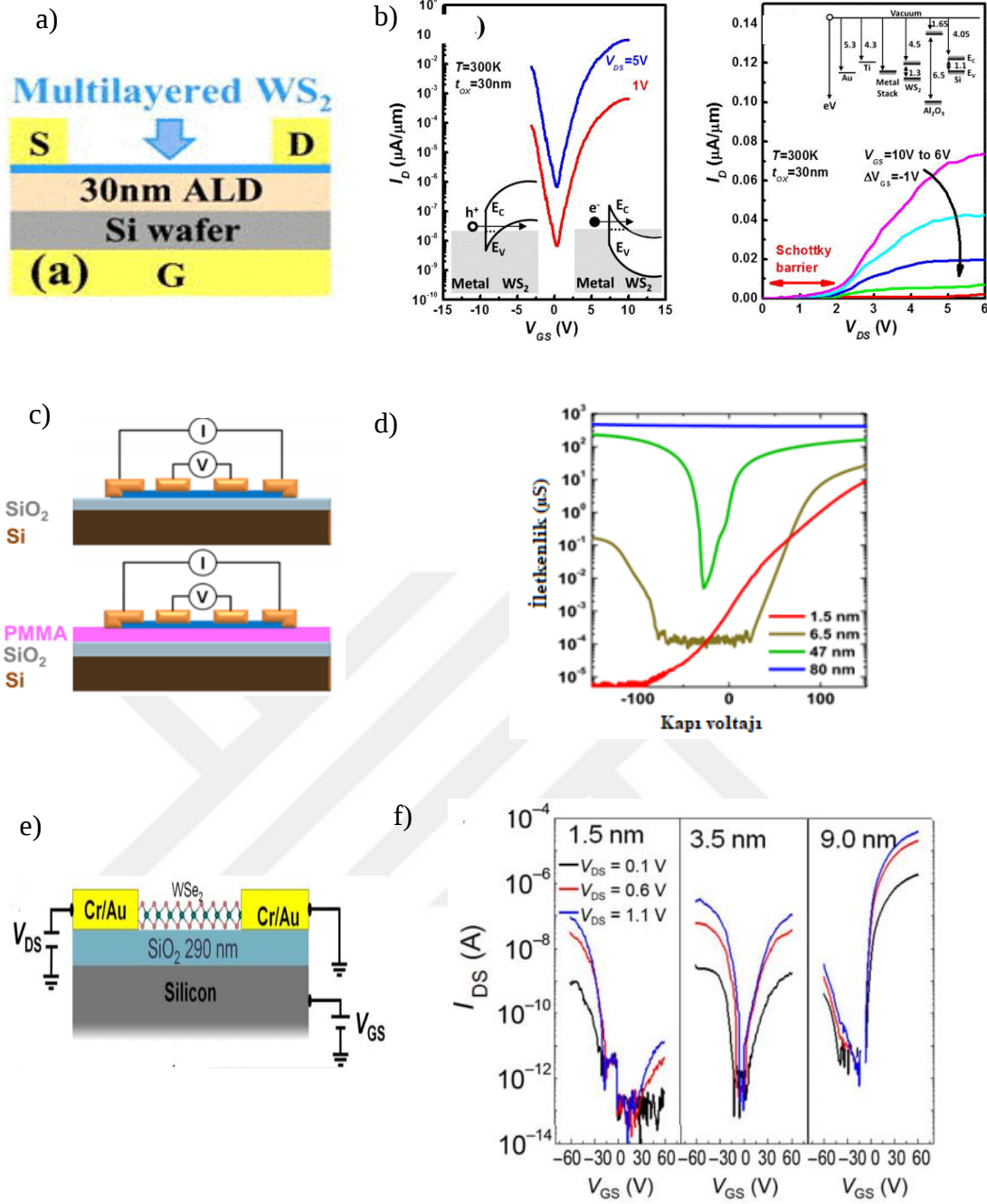
Bir başka çalışmada 170 K'de $>10^7$ gibi yüksek açma/kapama oranı ve büyük taşıyıcı mobilitesi (elektron mobilitesi $330 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve deşik mobilitesi $270 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olan çok katmanlı WSe₂ tabanlı ambipolar davranış gösteren EDLT'ler de çalışılmıştır (Chuang *et al.* 2014). Bu WSe₂ üzerine olan düşük dirençli bir iyonik sıvı kapısı ile h-bN kapsüllemesi ve grafen kontak noktaları kullanılarak elde edilmiştir. EDLT kullanımı, ambipolar davranışın WS₂ (Braga *et al.* 2012), (Jo *et al.* 2014), MoSe₂ (Zhu *et al.* 2015) ve WSe₂ (Huang *et al.* 2014) gibi TMDC'lerde araştırmasına yardımcı olmuştur.

Benzer ambipolar davranış, dielektrik malzemeler üzerindeki TMDC'lere dayanan geleneksel FET'lerde de rapor edilmiştir. Örneğin Hwang *et al.* (2012) yaptığı çalışmada WS₂'yi ilk defa kimyasal olarak sentezlemiş ve 30 nm Al₂O₃/p-Si üzerine aktarmışlardır (Şekil

22a). Akaç ve kaynak elektron demet litografisi (EBL) ile Ti/Au (5/100 nm) kullanarak oluşturulmuştur. $L/W=2.5/2$ μm olan kanal genişliği ve uzunluğu kullanılmıştır. Şekil 22b'deki geçiş özeğrisinde görüldüğü üzere ambipolar davranış gözlemlenmiştir (Hwang *et al.* 2012).

Bao *et al.* (2013) çalışmalarında hem SiO_2 hem de polimetil metakrilat (PMMA) üzerinde MoS_2 FET'ler üretmişler ve dört probu konfigürasyonla yük taşıyıcı mobilitesini ölçmüşleridir (Şekil 22c). Çok katmanlı SiO_2 üzerine MoS_2 FET'lerde kalınlıktan (15-90 nm) bağımsız olarak mobilite $30\text{--}60\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ve çoğu cihazlar tek kutuplu n-tipi davranış sergilemişlerdir. Bu durumun aksine, PMMA üzerindeki çok katmanlı MoS_2 FET'lerde ambipolar davranış ve kalınlık ile birlikte artan 50 nm kalınlıkta $470\text{ cm}^2/\text{Vs}$ (elektronlar) ve $480\text{ cm}^2/\text{Vs}$ (deşikler) mobilite gözlemlenmiştir (Şekil 22d).





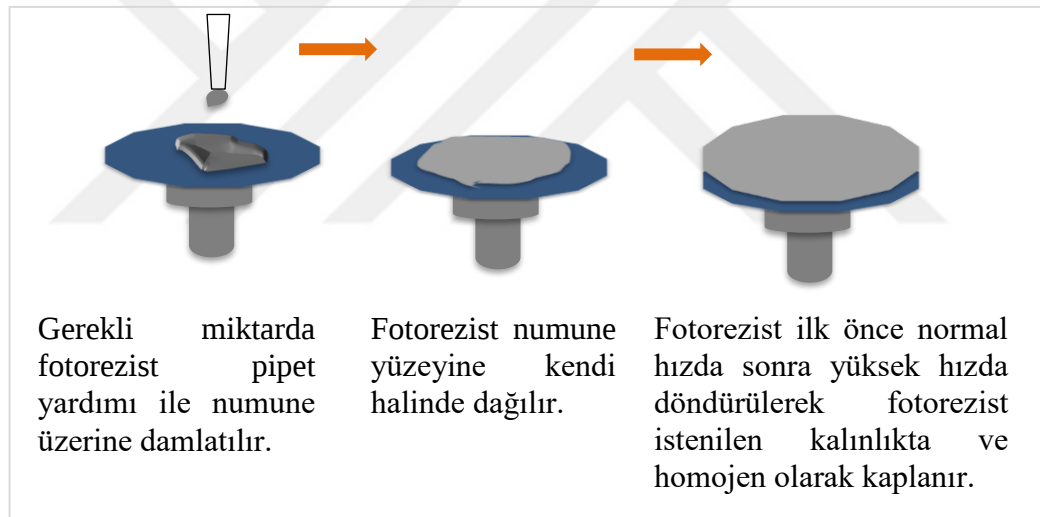
Şekil 22. Ambipolar davranış gösteren çalışmalara ait şematik gösterimler ve eğriler a) 30 nm Al_2O_3 üzerine birkaç katman WS_2 tabanlı transistörün şematik görüntüsü b) Ambipolar davranışın görüldüğü geçiş eğrisi ve çıkış eğrisi c) SiO_2/Si ve $\text{PMMA}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ üzerindeki dört problu MoS_2 aygıtlarının şematik gösterimi d) PMMA üzerinde dört MoS_2 aygıtı için yarı-logaritmik ölçekte V_G geçit voltajının bir fonksiyonu olarak iletkenlik eğrisi e) Cr/Au kontaklarla WSe_2 FET şematik gösterimi f) Birkaç tabaka WSe_2 FET'e ait geçiş eğrisi

Pudasaini *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada yüksek performanslı çok katmanlı WSe_2 FET'lerde taşıyıcı tipi kontrollü, kalınlık modülasyonu ve oksijen plazma yüzey işlemi ile gösterilmiştir. Cr/Au kontakları olan çok katmanlı WSe_2 FET cihazlarında taşıyıcı tipi kontrolü, ilk olarak WSe_2 kalınlığı modüle edilerek gösterilmiştir. Taşıyıcı tipi, sırasıyla <3 , ~ 4 ve >5 nm kalınlıklarda p-tipi, ambipolar ve n-tipi olmak üzere değişmektedir. Kalınlığa bağlı taşıyıcı tipi değişiminin, kalınlığın bir fonksiyonu olarak WSe_2 'nin bant aralığındaki değişikliklere ve metal

kontaklara göre taşıyıcı bant ofsetlerine bağlanmıştır. Ayrıca, uzaktan oksijen plazma iyileştirmesi ile güçlü birdeşik taşıyıcı doping etkisi sunulmuştur. n-tipi karakteristik bozulma olmadan da p-tipine dönüştürülmüş ve alan etkilideşik mobilitesi üç büyüklük derecesinde arttırılmıştır (Şekil 22e-f).

Optik Litografi[C2]

Litografi, bir maske üzerindeki geometrik şekillerin desenlerini, alttaş yüzeyini kaplayan ve rezist adı verilen UV ışığa duyarlı tabakaya aktarma işlemidir. Elektron demet litografi ve optik litografi yarıiletken teknolojisinde sıkça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında optik litografi kullanıldığı için optik litografiye yer verilmiştir. Optik litografi işleminin temel adımları yüzey temizliği, fotorezist kaplama, ön ısıtma işlemi, foto-maske hizalama, UV pozlama ve rezist çözme (geliştirme) olarak sıralanabilir. Fotorezist kaplamadan önce alttaşlar temizlik prosedüründen geçirilmektedir. Alttaş, döndürerek kaplama sisteminde (spinner) vakum miline tutturulur ve rezist alttaşın merkezine damlatılır ve alttaş kaplama cihazında yaklaşık 30 saniye döndürülür. Fotorezist kaplama adımları Şekil 23'te verilmiştir.

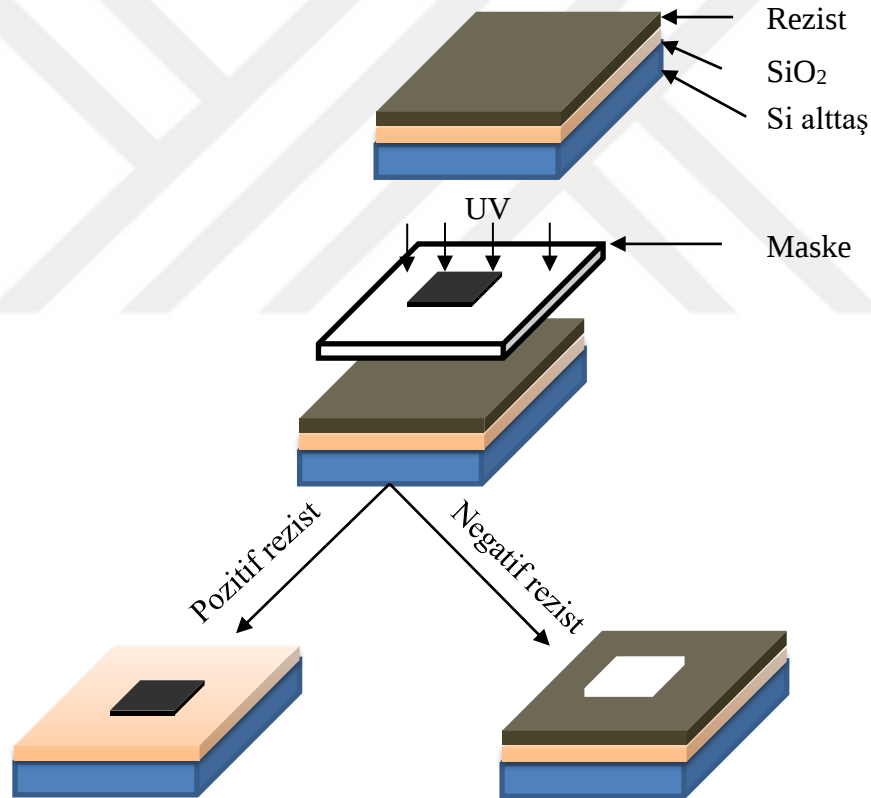


Şekil 23. Döndürerek kaplama cihazında (spinner) fotorezist kaplama adımları

Elde edilen rezist filminin kalınlığı, rezistin viskozitesi ile doğru orantılıdır ve dönme hızıyla ters orantılı olarak değişir. 1000 ile 10000 rpm dönme aralığında yaklaşık olarak 0,5 ile 1 µm mertebesinde film kalınlıkları elde edilebilir. Kaplama işleminin ardından fotorezisti yoğun hale getirmek için ön ısıtma (pre-bake) kullanılan reziste bağlı olarak yaklaşık 80-100°C' de 40-60 saniye yapılmaktadır. Kullanılacak desenler bilgisayar destekli tasarım sistemleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Maskeler tipik olarak krom veya demir oksit gibi sert yüzeyli malzemelerle kaplanmış camdan yapılmaktadır. Maske kusurlarının sayısı nihai aygıt verimi üzerinde derin bir etkiye sahiptir.

Şekil 24 aygıt desenlerinin bir maskeden alttaşa aktarılması adımlarını göstermektedir. Fotomaske ve numune üzerinde bulunan hizalama işaretleri kullanılarak numune ve maske hizalanmaktadır. Hizalamanın doğru yapılması birkaç litografi adımından oluşan prosesler için oldukça önemlidir ve sonuçta çıkan çalışan aygıt sayısını değiştirmektedir. Kullanılan hizalama cihazlarının markasına göre farklı kontak modları (soft, hard ve vacumm) bulunmaktadır. UV dalga boyunun değeri ile birlikte kontak modu elde edilen çözünürlük için önemlidir. Bu adımların hepsi temiz oda şartlarında ve fotorezistler 0,5 μm 'den daha büyük dalga boylarına duyarlı olmadığından sarı ışık altında yapılmaktadır.

Desen aktarımı işleminden sonra tanımlandıktan sonra, alttaki tabakanın maskelenmiş kısımlarını seçici olarak çıkarmak için bir fotorezist çözme (develop) işlemi uygulanmaktadır. Ardından alttaş durulanır, kurutulur ve reziste zarar vermeyecek bir ortama koyulur.



Şekil 24. Optik litografi transfer süreci

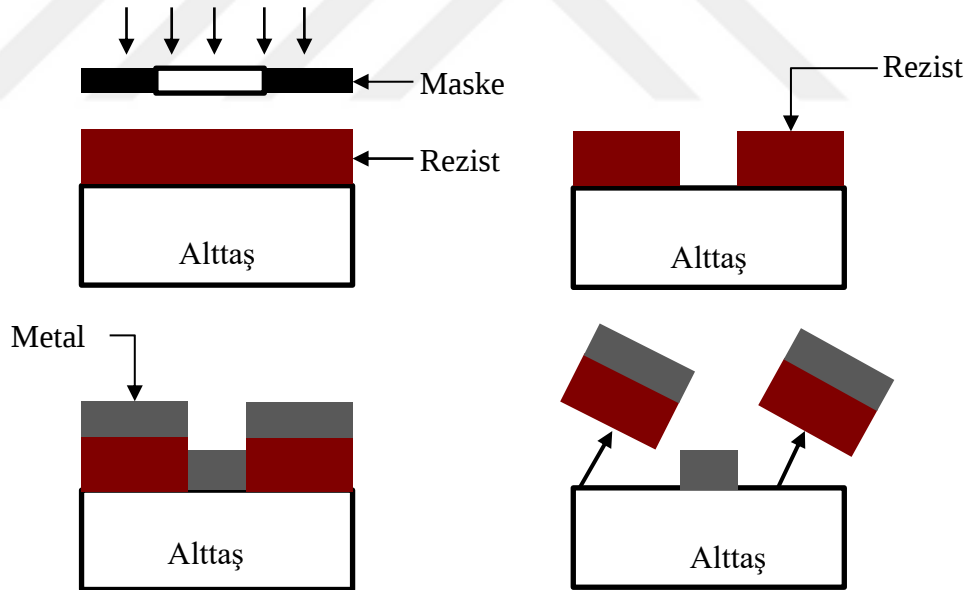
Litografi işleminde pozitif veya negatif olmak üzere iki tür rezist kullanılmaktadır. Pozitif rezist kullanıldığında pozlandırılan bölge daha çözünür hale gelir ve böylece geliştirme aşamasında bu bölge kolayca uzaklaştırılmaktadır. Sonuç olarak, Şekil 24'te görüldüğü gibi pozitif rezist ile oluşturulan desenler maske üzerinde olan desenler ile aynıdır. Negatif rezist kullanıldığında pozitif rezistte oluşan durumun tam tersi gerçekleşir. UV ışığa maruz kalan bölgeler daha az çözünür olur ve oluşan desenler maske üzerindeki desenlerinin tersidir.

Negatif bir fotorezistin en büyük dezavantajı, rezistin developer çözücüsünü emmesi ve şişerek, fotorezistin çözünürlüğünü sınırlamasıdır.

Fotolitografide rezist çözme işleminin ardından, istenmeyen kalıntıları uzaklaştırmak ve daha kararlı hale getirmek için uzun ısı işlem (post-bake) kullanılan rezistin türüne göre değişmekle birlikte yaklaşık 120 °C 10 dk. uygulanmaktadır.

Metal kaplama

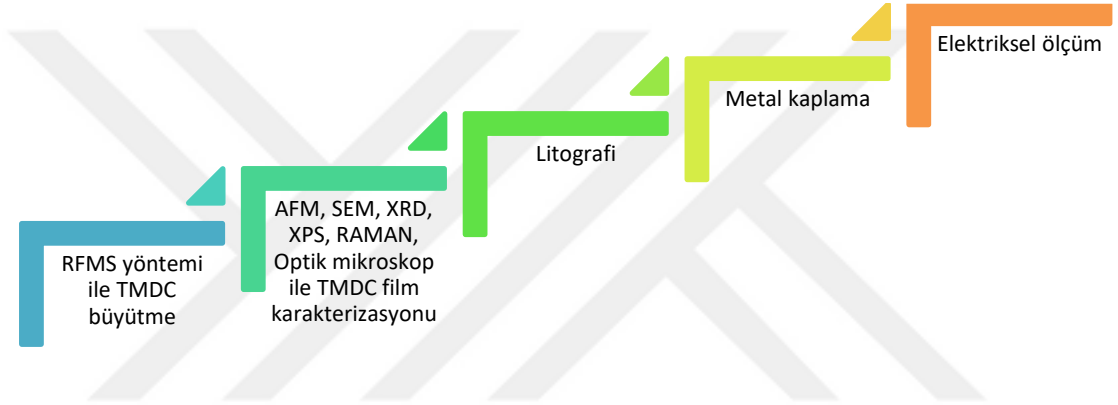
Fotolitografinin diğer bir adımı metalizasyondur. Bu aşamada metal, bazı bölgeleri rezist kaplı alttaşın tüm yüzeyi üzerine çeşitli tekniklerle kaplanmaktadır. Daha sonra fotorezistle birlikte istenmeyen metal bölgeleri çözücü yardımıyla kaldırılmaktadır. Bu işleme lift-off denir. Şekil 25’de görüldüğü gibi metalin kalınlığı rezistin kalınlığından küçükse lift-off işlemi ile istenmeyen yerlerde ki metal kaldırılmış olmaktadır, eğer metal kalınlığı fotorezist kalınlığından fazla olursa lift-off adımı problem olmaktadır. Bu işlem metal dışında başka malzemeler içinde uygulanmaktadır, burada fotorezist istenmeyen bölgelerden malzemelerin kaldırılması için kullanılan bir araçtır. Bu tez çalışmasında fotorezist malzemesini temizlemek ve lift-off için aseton (CH_3COCH_3) çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 25. Metalizasyon ve Lift-off

MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışması kapsamında 2B FET ve p-n eklem fabrikasyonu için ilk olarak WS₂, MoS₂ ve MoS₂/WS₂ heteroyapı yarıiletken filmleri sentezlenmiştir. Sentezlenen filmlerin çeşitli yöntemler ile karakterizasyonu yapılmıştır. Daha sonra litografi yöntemleri ile aygıt desenleri çıkarılmış, metal kaplama ile kontaklar oluşturulmuştur. Daha sonra üretilen aygıtların elektriksel ölçümleri alınıp elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. İşlem adımları Şekil 26’da verilmiştir. Ayrıca FET fabrikasyonunda alttaş olarak gözenekli silisyum üretilmiş ve 2B FET üretilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.



Şekil 26. Yapılan çalışmanın işlem adımları

2B Malzeme Hazırlanması

İlk olarak film büyütülecek yüzey olan yoğun p-tipi boron katkılı 500 µm kalınlığında öz direnci 0,002-0,005 ohm.cm olan Si sırasıyla aseton ve metanol kullanılarak 10 dk. ultrasonik temizleyicide bekletilmiştir ve 5 dk. iyonize su ile durulanmıştır. Daha sonra sırasıyla RCA1 ve RCA2 prosedürleri uygulanmıştır.

RCA1

- I. NH₃:H₂O₂:di H₂O (1:1:5) çözeltisi 60° kadar ısıtılıp Si’yi 10 dk. içinde bekletiyoruz.
- II. DI H₂O ile durulayıp %10’luk HF çözeltisinde 30 s bekletiyoruz.
- III. DI H₂O ile duruluyoruz.

RCA2

- I. HCl:H₂O₂:di H₂O (1:1:6) çözeltisi 60°’ye kadar ısıtılıp Si’yi 10 dk. içinde bekletiyoruz.
- II. DI H₂O₂ ile durulayıp %10’luk HF çözeltisinde 30 s bekletiyoruz.
- III. DI H₂O ile ultrasonik temizleyicide 10 dk. duruluyoruz.
- IV. Azot gazı ile kurutuyoruz.

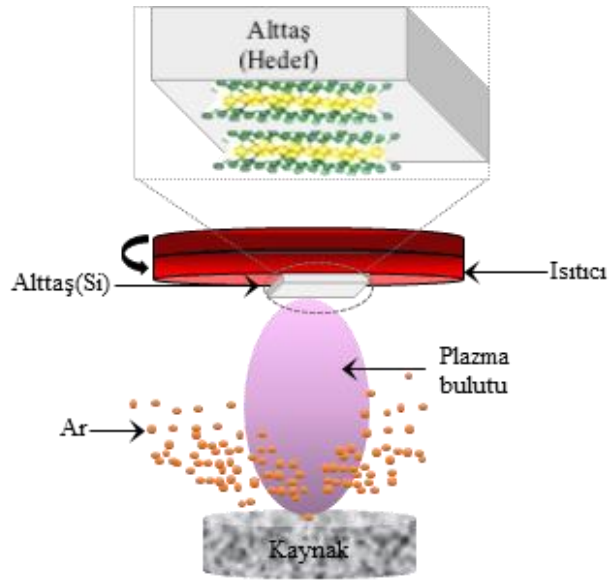
Temizlik aşamasından sonra üretilcek FET aygıtlar için, Si büyütme parametreleri verilen SiO₂ ile saçtırtma cihazında 300 nm kalınlığında kaplanmıştır. Bu işlem p-n eklem yapısında gerçekleştirilmemiştir. Daha sonra FET için Si/SiO₂ yüzey, p-n eklem için Si üzerine filmler magnetron saçtırtma yöntemi ile farklı sürelerde TMDC film kaplanmıştır. Ayrıca gözenekli silisyum ile üretilen FET’lerde gözenekli silisyum yalıtkan özellik göstermesinden dolayı SiO₂ yalıtkan tabakaya gerek duyulmamıştır, TMDC film direkt olarak temizlik prosedüründen geçmiş Si alttaş üzerine istenilen kalınlıkta büyütülmüştür.

RF Magnetron Saçtırtma Sistemi (RFMS)

RFMS metallerin, yarıiletkenlerin, alaşımların ve diğer bileşiklerin ince filmlerini oluşturmak için kullanılan fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Saçtırtma (sputtering) Grove tarafından 1852 yılında İngiltere’de ve Plucker tarafından 1858 yılında Almanya’da keşfedilmiştir. Bu yöntem iyonlarla bombardıman yapıp materyali kaynak (katod)’tan koparıp silikon yonga gibi bir alttaş (anot) üzerine yoğunlaştırılmasını içermektedir. Asıl gazlardan seçilen iyonlar genel olarak argon (Ar)’dur ve 10 Torr’luk bir taban basıncı altında vakum odası içinde kızdırma deşarj plazmasında üretilir. Bombardıman işleminin bir parçası olarak üretilen sekonder elektronlarda plazmanın korunmasında rol oynarlar.

Bu büyütme yönteminde doğru akım (DC) veya radyofrekans (RF) voltaj kaynağı kullanılabilir. DC akım/voltaj iletken hedeflerde, RF akım/voltaj iletken olmayan hedeflerde kullanılmaktadır. DC saçtırtma yöntemi hedef üzerinde biriken pozitif yüklerin pozitif yüklü Ar iyonlarını itip saçtırtma işlemine son vermesinden dolayı yalıtkanlar için uygun değildir. Bununla birlikte RF saçtırtma yöntemi yalıtkanların düşük basınçlarda büyütülmesini mümkün kılar.

Geleneksel saçtırtma yöntemlerinden farklı olarak magnetron saçtırtma yönteminde manyetik alan plazmayı belli bir bölgeye yoğunlaştırarak saçtırtma hızının artırılmasına yardımcı olur. Elektrik alanına dik uygulanan manyetik alan elektronların hedef yüzeyindeki hareketlerini sınırlar. Bu durum elektron-atom çarpışma olasılığını artırır, daha yüksek iyonlaşma oranları ve hedef yüzeyinin yakınlarında yoğun bir plazma oluşur. Sonuç olarak, bunların hepsi büyütme oranlarını artırmaya katkı sağlar. Ayrıca bu yöntemle büyütülmüş filmlerin mikro yapısı, gelen parçacıkların yapısı, akışı ve enerjileri gibi parametreler ile şekillenir. Magnetron saçtırtma sisteminin şematik resmi Şekil 27’de verilmektedir.



Şekil 27. Magnetron saçtirtma sisteminin şematik resmi

Bu çalışmadaki 2B yarıiletken filmlerin büyütülmesinde kullanılan RF magnetron saçtirtma sisteminin resmi Şekil 28’de görülmektedir.



Şekil 28. RF magnetron saçtirtma cihazı

Büyütme sistemi içerisinde bulunan ve filmin kalitesini bozabilecek istenmeyen gazların filme bulaşmasını engellemek için başlangıç basıncı 10^{-7} Torr yapılmıştır. Film büyütme aşamasında basınç 20 mTorr civarlarına getirilmiştir. % 99,8 saflıkta WS_2 ve % 99,9 MoS_2 hedef kullanılmıştır. Büyütme parametreleri Ek-1(Tablo 13)’te verilmiştir.

2B Malzemelerin Karakterizasyonu

Bu tezde, 2B örnekleri karakterize etmek için altı farklı teknik kullanılmaktadır: Optik mikroskop, x-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), atomik kuvvet mikroskopisi (AFM),

Raman ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM). Optik mikroskop ile 2B numunelerde yüzey kalitesini ve büyütülen malzemenin sürekliliği görülmektedir. Raman spektroskopisi, numunenin titreşim modları, bant aralığı, katman sayısı hızlı bir şekilde tahmin edilebilmektedir. XPS ile malzemenin elementel bileşenleri analiz edilmiştir. Yüzey ve morfolojik yapıları AFM ve SEM kullanılarak analiz edilmiştir. Bu bölümde kullanılan tekniklerin prensipleri ve deneysel karakterizasyon sırasındaki parametreler açıklanmıştır. Bu çalışmada da ki 2B filmlerin karakterizasyon sonuçları araştırma bulguları ve tartışma bölümünde gösterilecektir.

Optik mikroskop

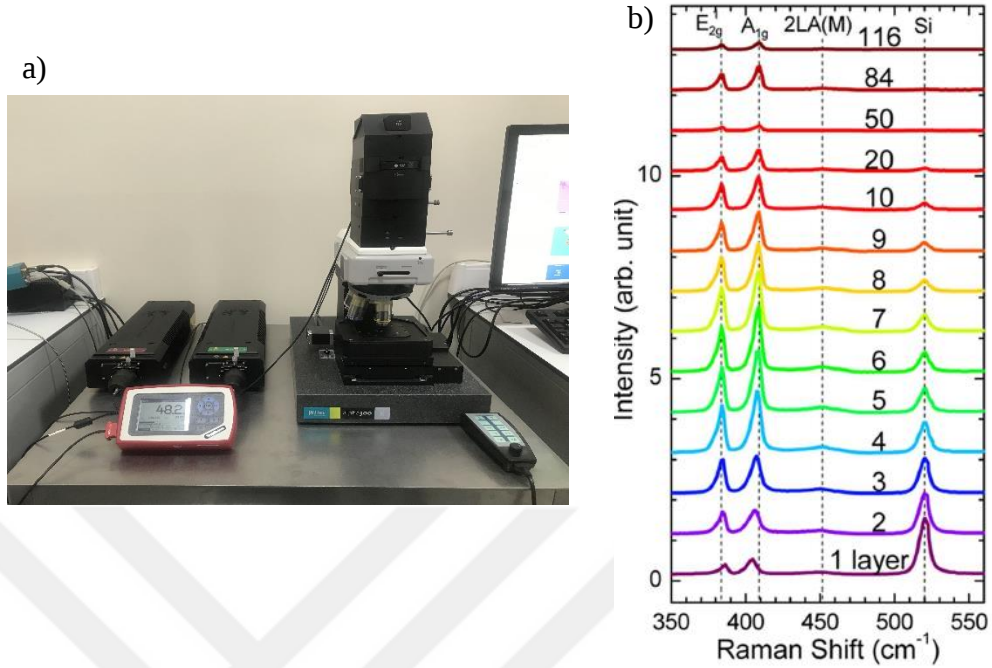
MoS₂ ve WS₂ filmlerin optik görüntüleri optik mikroskopi (ZEISS) ve bir CCD kamera ile kaydedilir. Ayrıca, optik görüntülerdeki kontrast farkı ile katmanların sayısını belirlenebilmektedir.

Raman spektroskopisi

Raman etkisi 1928'de C. V. Raman, K. S. Krishnan ve C. V. Raman tarafından keşfedilmiştir. Raman spektroskopisi numune tanımlama ve numune miktarı belirlemek için moleküler titreşimler hakkında bilgi veren bir tekniktir. Elektromanyetik dalgalar ile malzemenin titreşimleri arasındaki etkileşimden kaynaklanan bir temele sahiptir. Raman Spektroskopisi, genellikle bir lazer kaynaktan oluşan tek kromatik ışığın esnek olmayan saçılmasına dayalı bir spektroskopi tekniğidir. Burada esnek olmayan saçılma, tek kromatik ışıpta 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 hızlı ve tahribatsız bir yöntem olan Raman Spektroskopisi katı, sıvı ve gaz numunelerin incelenmesinde kullanılabilir.

Raman spektrumlarının yarı maksimumundaki tam genişlik (FWHM), kristalin kalitesini gösterir (O'Brien *et al.* 2015). Düşük frekanslı Raman modları TMDC'lerin katman sayısı, homojenlik, kristal yapısı ve tane sınırları gibi özelliklerini gösterir. Raman spektrumları, çeşitli TMDC'ler için düzlem içi (E_{1g}) ve düzlem dışı (A_{1g}) titreşim modlarından gelen iki ana tepe noktası içerir. Bu iki ana tepe arasındaki enerji farkına bakarak, filmin katman sayısını belirlenebilmektedir (Liang *et al.* 2018). Şekil 29'da örnek bir MoS₂ Raman spektroskopisi ve kullanılan cihazın şematik resmi ile birlikte cihaz resmi görülmektedir. Bu

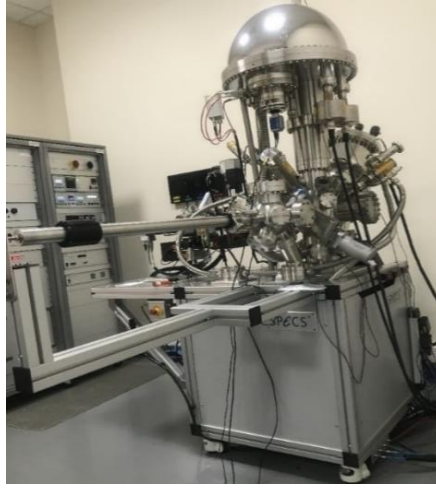
çalışmada Raman haritalama ve Raman spektroskopisi Witec Alfa 300 ile alınmıştır. Ölçümler 5 mWatt gücünde ve 532 nm lazer kullanılarak alınmıştır.



Şekil 29. a) Ölçümler için kullanılan Raman b) Bir tabakadan yığın MoS₂'ye kadar Raman spektrumları (Li *et al.* 2012)

XPS

XPS bir malzemede bulunan elementlerin elementel bileşimini ve elementlerin kimyasal durumunu veren yüzeye duyarlı bir tekniktir. Sadece valans elektrona sahip olduklarından helyum ve hidrojen dışındaki bütün elementler XPS ile tespit edilebilmektedir. XPS spektrumları bir malzemenin yüzeyinin X-ışını hüzmesi ile bombardıman edilmesi ile elde edilirler. Yeterli enerji ile X-ışını foton numunedeki atomların çekirdek elektronlarını uyarabilir ve fotoelektronların dışarı atılmasına sebep olabilir. XPS ölçümleri numune yüzeyinde gaz moleküllerinin adsorpsiyonunu ve fotoelektronların saçılmasını önlemek için ultra yüksek vakum ortamında gerçekleştirilirler. X-ışınları tarafından 90°'lik bir açıyla ışınlığında, fotoelektronlar yaklaşık 10 nm'lik bir derinlikten tespit edilir. Bu örnekleme derinliği açı ile değiştirilerek malzeme üzerinde derinlik profili bilgisi sağlanır. Bu çalışmada XPS ölçümleri Specs-Flex-Mod marka cihazla alınmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. XPS cihazı

SEM

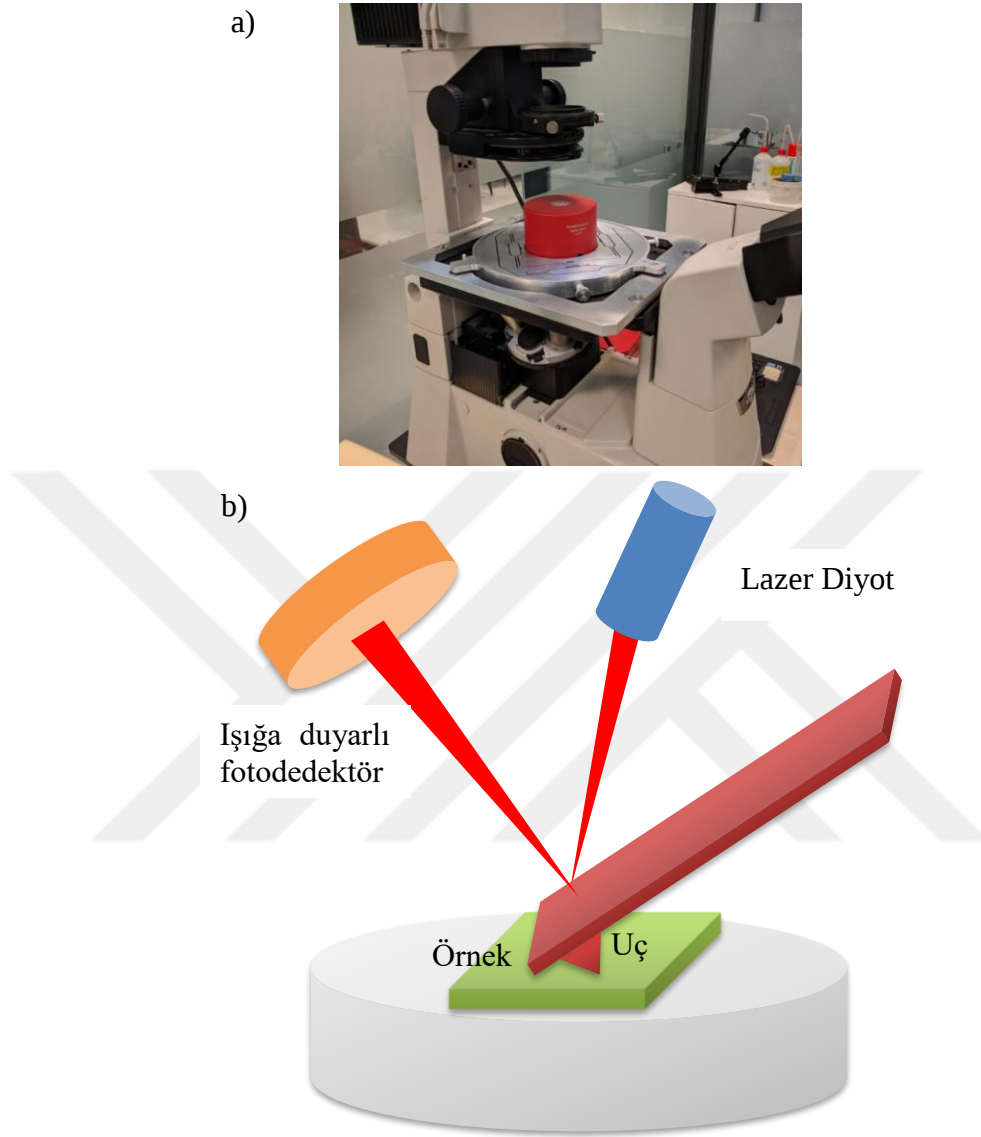
SEM katı malzemelerin yüzey ve yüzey altı analizleri için bir görüntüleme tekniğidir. Bir numunenin görüntüleri numunenin yüzey topografyası ve bileşimi hakkında bilgi içeren sinyalleri üretmek için numunedeki atomlarla etkileşime giren odaklanmış elektron ışını taranarak üretilir. Bu çalışmada yüzey görüntüleri alan emisyonlu SEM yoluyla elde edildi. Standart algılama modunda sekonder elektronlar örnek yüzeyine çok yakın bir yerden yayılır. Sonuç olarak örnek yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntüleri ile 1nm'den küçük ayrıntılar SEM ile ortaya çıkarılabilir. Ayrıca yüzeyin 3 boyutlu görüntüleri elde edilebilir. Enerji dağıtıcı spektroskopi (EDX) özellikleri ile donatılmış bir kurulum ile numune elektron ışını ile ışınlandırıldığında yayılan karakteristik X-ışınlarının analiz edilmesiyle numunenin elementel kompozisyonu hakkında bilgi elde edilebilir.

SEM görüntüleme, gaz moleküllerinin varlığının elektron ışınlarının hızlı yayılmasına ve zayıflamasına neden olmasından dolayı genel olarak vakum altında yapılır. Numuneler sarjı önlemek için elektriksel olarak iletken olmalıdırlar. İletken olmayan numuneler ince bir altın tabakası püskürtülerek iletken hale getirildikten sonra ölçüm alınır.

AFM

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) bir nano skalada çözünürlükleri olan bir tür tarama probu mikroskopisidir. Üç boyutlu bir yüzey haritası elde etmek için numune yüzeyi üzerinde taranan keskin uçlu (prop) bir konsol içerir. Şematik resim ve kullanılan AFM'nin fotoğrafı Şekil 31'de görülmektedir. Konsolun dikey ve yanal sapmaları konsolun arakasından bir lazer ışını yansıtılarak ölçülür ve bu daha sonra konuma duyarlı bir fotodedektöre çarpar. AFM temas (contact) ve dokunma (tapping) modu gibi bir dizi modda ortam koşullarında çalıştırılabilir. Dokunma modunda temas moduna göre numune yüzeyi ve prob ucundaki hasar daha az olur.

AFM ile yüzey morfolojisi ve kaplanan filmin kalınlığı hakkında bilgi edinilebilir. Bu çalışmada üretilen filmlerin kalınlığı “NANOMAGNETICS INSTRUMENTS” firmasına ait ezAFM ile belirlenmiştir.



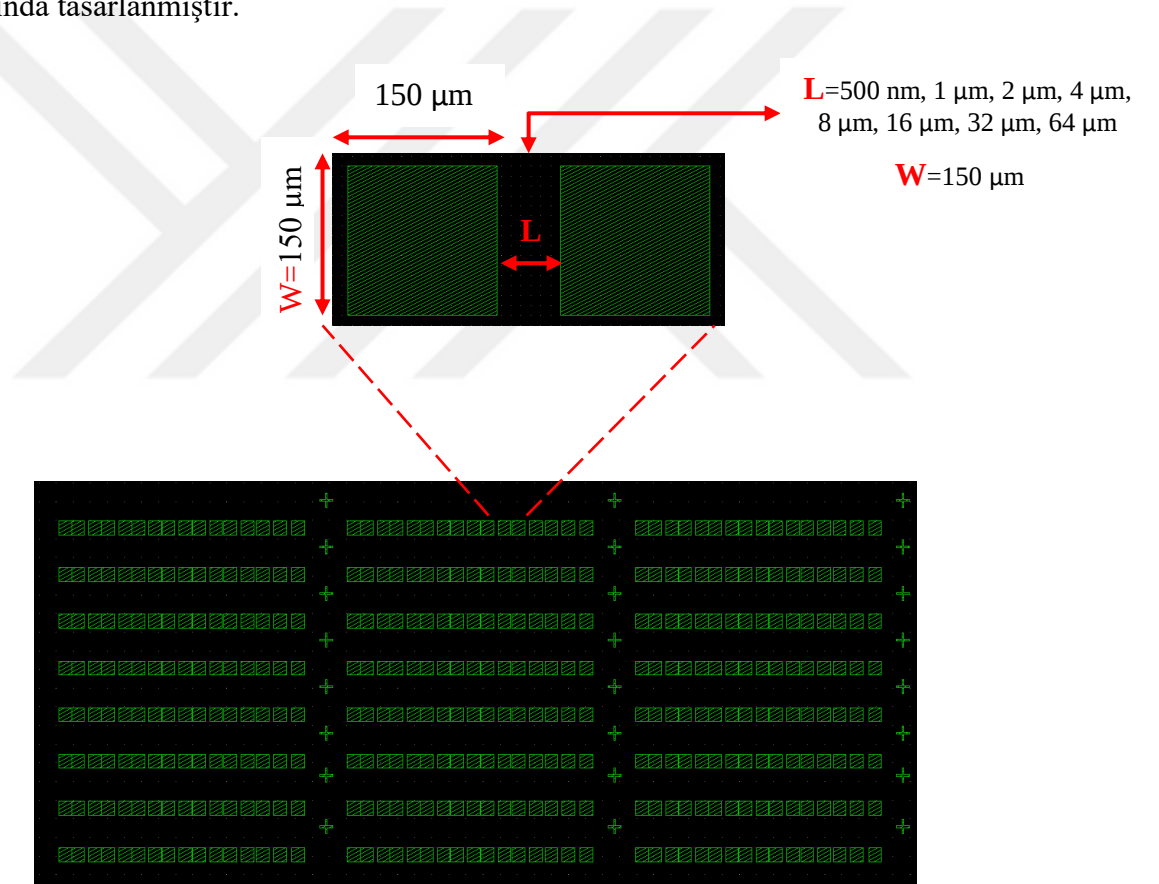
Şekil 31. a) Kullanılan AFM’nin fotoğrafı b) AFM şematik gösterimi.

2B Aygıtların Fabrikasyonu

2B malzemelerin farklı kalınlıklarda (WS_2 veya MoS_2) sentezlenmesi yapıldıktan sonra bu malzemelere dayalı FET, heteroeklem FET ve p-n eklem fabrikasyonu yapılmıştır. Fabrikasyon için ilk olarak maske tasarlanmıştır. Kontakların oluşturulması için optik litografi tekniği kullanılmıştır. Metal buharlaştırma ve lift-off adımları ile aygıt oluşturulmuştur. Aygıt üzerinde kalan rezist kalıntıların giderilmesi ve kontakların iyileştirilmesi için tavlama yapıp aygıt ölçüme hazır hale getirilmiştir. Bu bölümde maske tasarımı, litografi adımları, metal kaplama, lift-off ve tavlama adımları detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Fiziksel maske

Fabrikasyona başlamadan önce ilk olarak oluşturulacak aygıtın fiziksel yapısına karar verilmiştir. Layout programı kullanılarak hazırlanan maskede hem üst kapı hem de arka kapı olacak şekilde desenler oluşturulmuştur, fakat daha sonra fabrikasyon kolaylığından dolayı arka kapı olacak şekilde fabrikasyon yapılmasına karar verilmiştir. Çizilen desenler 10 cm×10 cm krom kaplı kuartz cam üzerine aktarılmıştır. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tür maske bulunmaktadır. Bu çalışmada pozitif maske kullanılmıştır. Pozitif maskede koyu alanlar UV geçirmemekte, açık alanlar UV geçirerek geliştircide kalkmaktadır, böylece kontak alanları oluşturulmaktadır. Akaç ve kaynak elektrotlarının oluşturulması için 150 μm ×150 μm boyutlarında alanlar oluşturulmuştur. Şekil 32’de görüldüğü gibi akaç ve kaynak arasındaki mesafe 500 nm, 1 μm , 2 μm , 4 μm , 8 μm , 16 μm , 32 μm ve 64 μm olacak şekilde farklı kanal aralıklarında tasarlanmıştır.



Şekil 32. Layout programı kullanılarak tasarlanmış FET maskesi

Fotolitografi

Bu tez çalışmasında aşağıda verilen fabrikasyon adımları kullanılarak aygıt üretilmiştir. Boron katkılı Si (p^{++} Si) parlak olmayan yüzeyi üzerine arka kontak oluşturmak için ilk olarak Al kaplanmış ve omik kontak yapmak için 550°C’de 3 dk. tavlannmıştır. Daha sonra oksit tabakası gerekli FET’ler için Si’nin parlak olan yüzeyi üzerine 300 nm SiO_2 kaplanmış ve bu

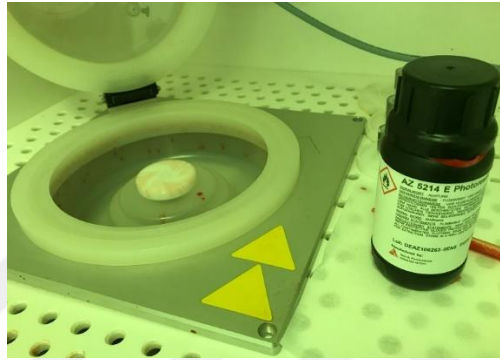
adımlardan sonra fotolitografi adımlarına geçilmiştir. Oksit tabakası gerekli olmayan gözenekli Si tabanlı FET ve p-n eklem için aşağıdaki işlemlere geçilmiştir.

1. İlk olarak lift-off işleminin daha kolay olabilmesi için SiO_2/Si alttaş HMDS ile kaplanmıştır.
1. AZ5214 E fotorezist kaplama cihazı kullanılarak SiO_2/Si alttaş üzerine HMDS kaplandıktan sonra

a)10 s 2000 rpm

b)50 s 6000 rpm

hızla kaplanmıştır (Şekil 33). Bu parametreler her cihaz için farklı olabildiğinden kalibrasyon yapılması gerekmektedir.



Şekil 33. Kullanılan fotorezist ve kaplama cihazı

2. Isıtıcı üzerinde 55 s 90° 'de ön ısıtma yapılmıştır (Şekil 34).



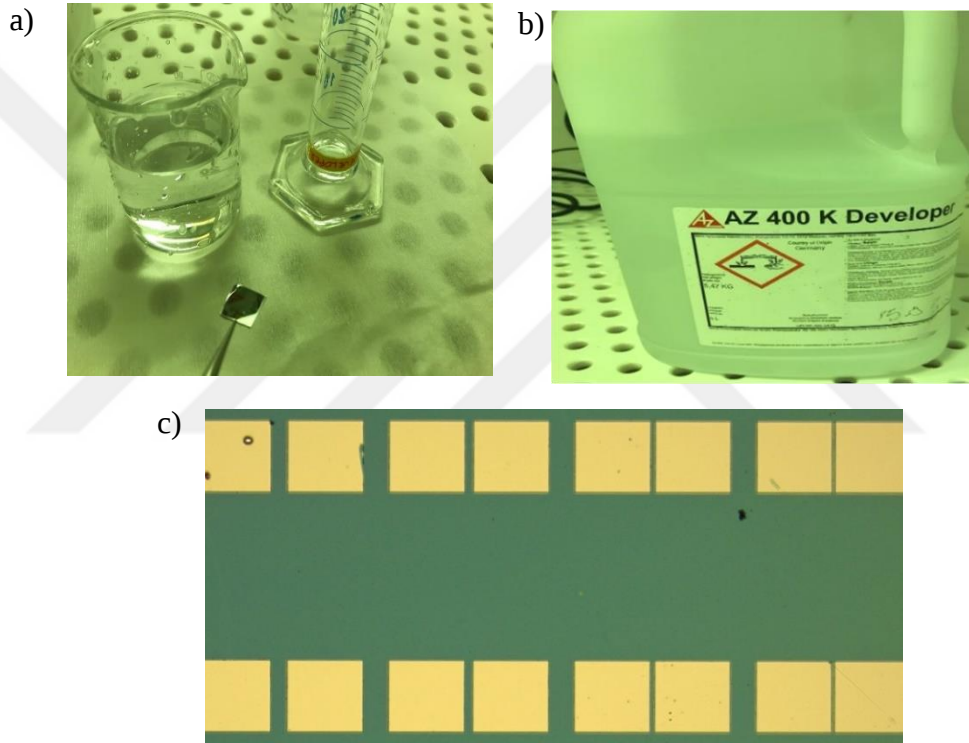
Şekil 34. Ön ısıtma aşaması

3. Atatürk Üniversitesi DAYTAM temiz odada bulunan Süss Microtec MBJ4 maske hizalayıcı kullanılarak fotorezist kaplı alttaş vakum kontak modunda 5 s pozlandırılmıştır (Şekil 35).



Şekil 35. Süss Microtec MBJ4 maske hizalayıcı

4. Pozlandırma aşamasından hemen sonra alttaş deiyonize su ile 1:3 oranında hazırlanan geliştirici çözeltisine 30 s daldırılmış ve ardından deiyonize su ile durululap azot gazı ile kurutulmuştur (Şekil 36).

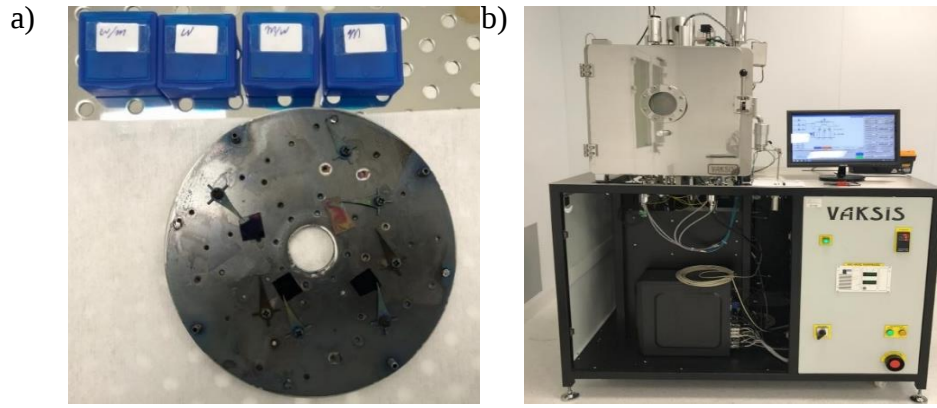


Şekil 36. Desen oluşturma aşaması a) 1:3 (geliştirici:su) çözeltisi b) Kullanılan geliştirici c) Pozlandırma ve geliştirme sonrası mikroskop görüntüsü

Metal kaplama

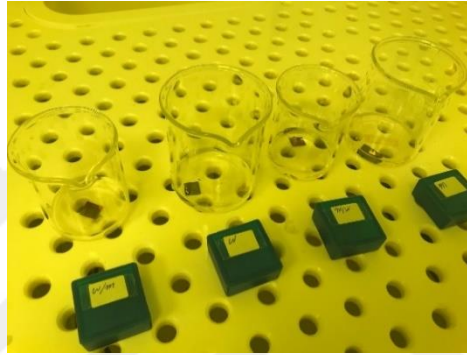
Fotorezist kaplama, UV pozlandırma ve geliştirme adımlarından sonra metal kaplama adımına geçilmiştir (Şekil 37).

1. Akaç ve kaynağı oluşturmak için yine DAYTAM’da bulunan VAKSİS saçtırtma cihazı kullanılarak alttaş Ti/Pt (5nm/50nm) kaplanmıştır. Kaplama parametreleri Ek-1 (Tablo 14)’te verilmiştir.



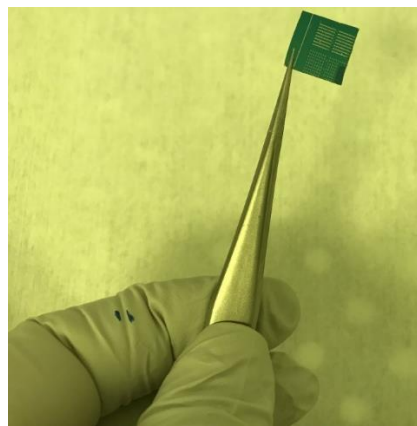
Şekil 37. Metal kaplama aşaması a) Kaplama için hazırlanmış örnekler b) VAKSIS saçtirtma cihazı

2. Kaplama işleminin hemen ardından lift-off işlemi için alttaş aseton içine atılıp istenmeyen yerlerde ki metallerin kalkması sağlanmıştır (Şekil 38).



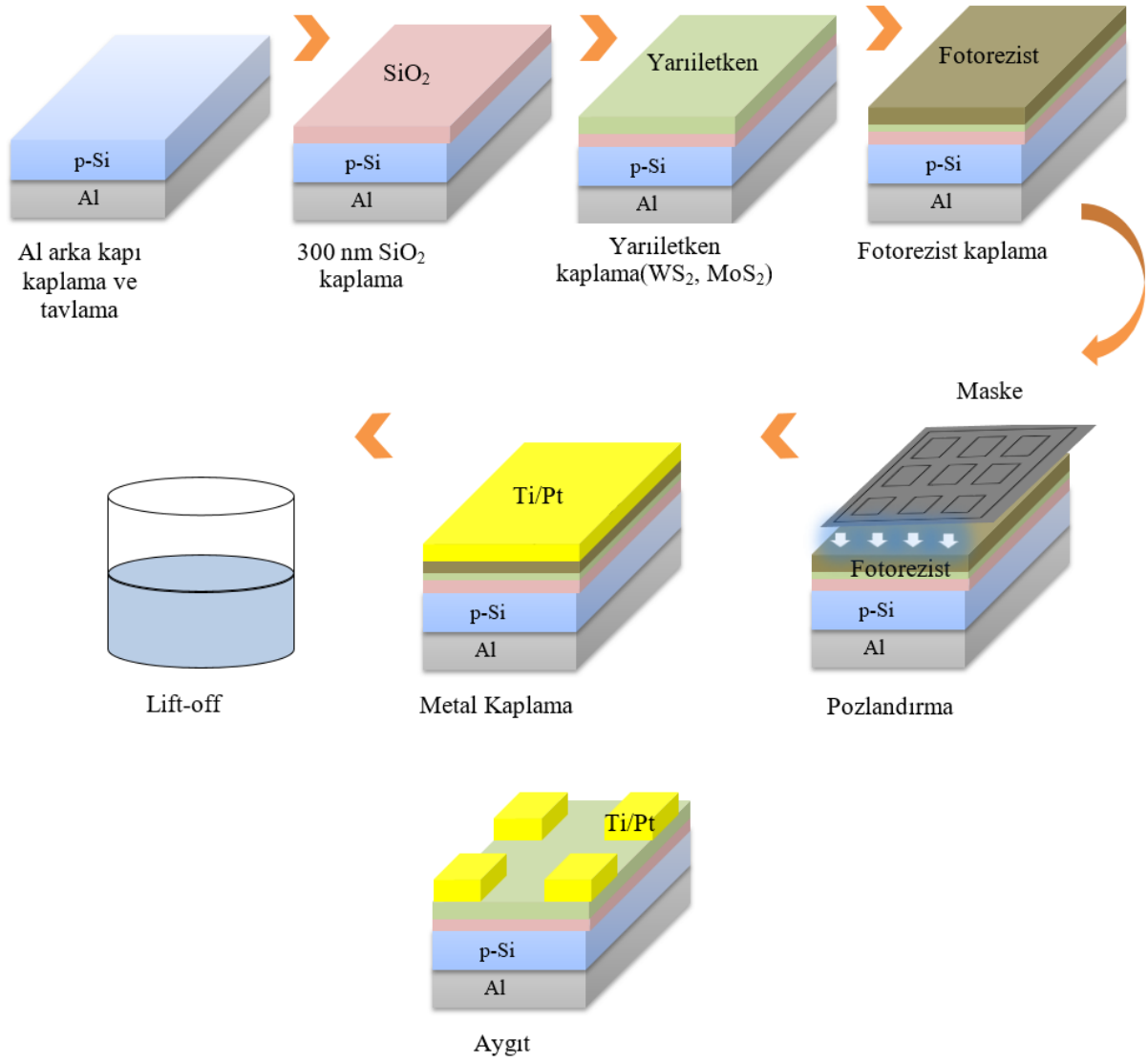
Şekil 38. Metal kaplama sonrası lift-off prosesi

Aygıt oluşturulduktan sonra kontaklar üzerinde herhangi bir kalıntının kalmaması ve kontakların daha iyi olması için Ar (Argon) gazı altında 300° 10 dk. tavlınmış ve aygıt ölçüm için hazır hale getirilmiştir (Şekil 39).



Şekil 39. Aygıt, ölçümlerin alınabilmesi için hazır hale getirilmiştir.

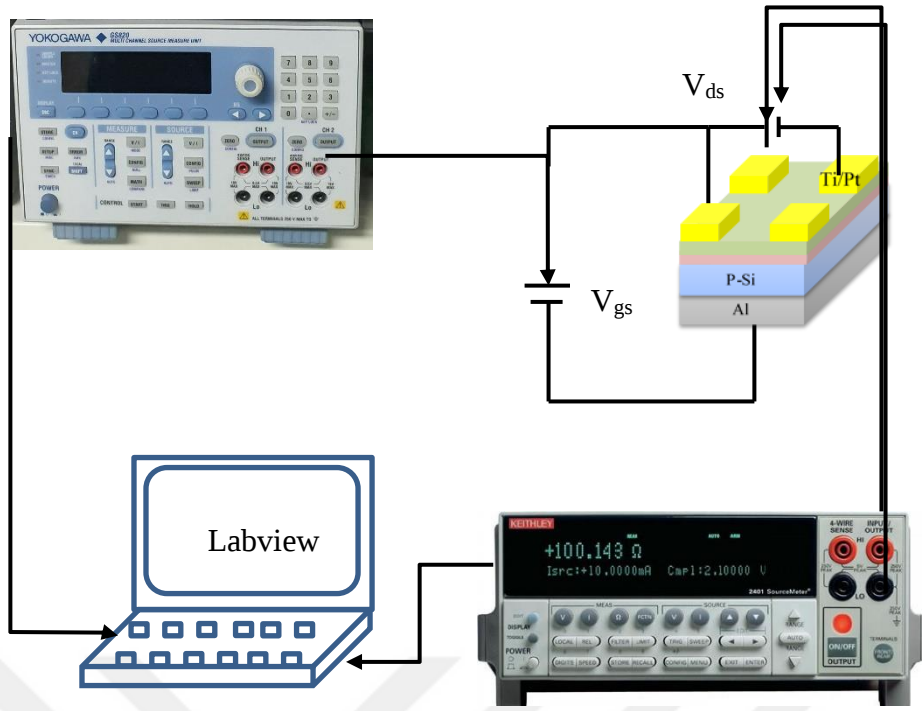
Fabrikasyon adımlarının hepsi Atatürk Üniversitesi DAYTAM'da bulunan temiz oda şartlarında yapılmıştır. Fabrikasyon adımları şematik olarak Şekil 40'ta verilmiştir.



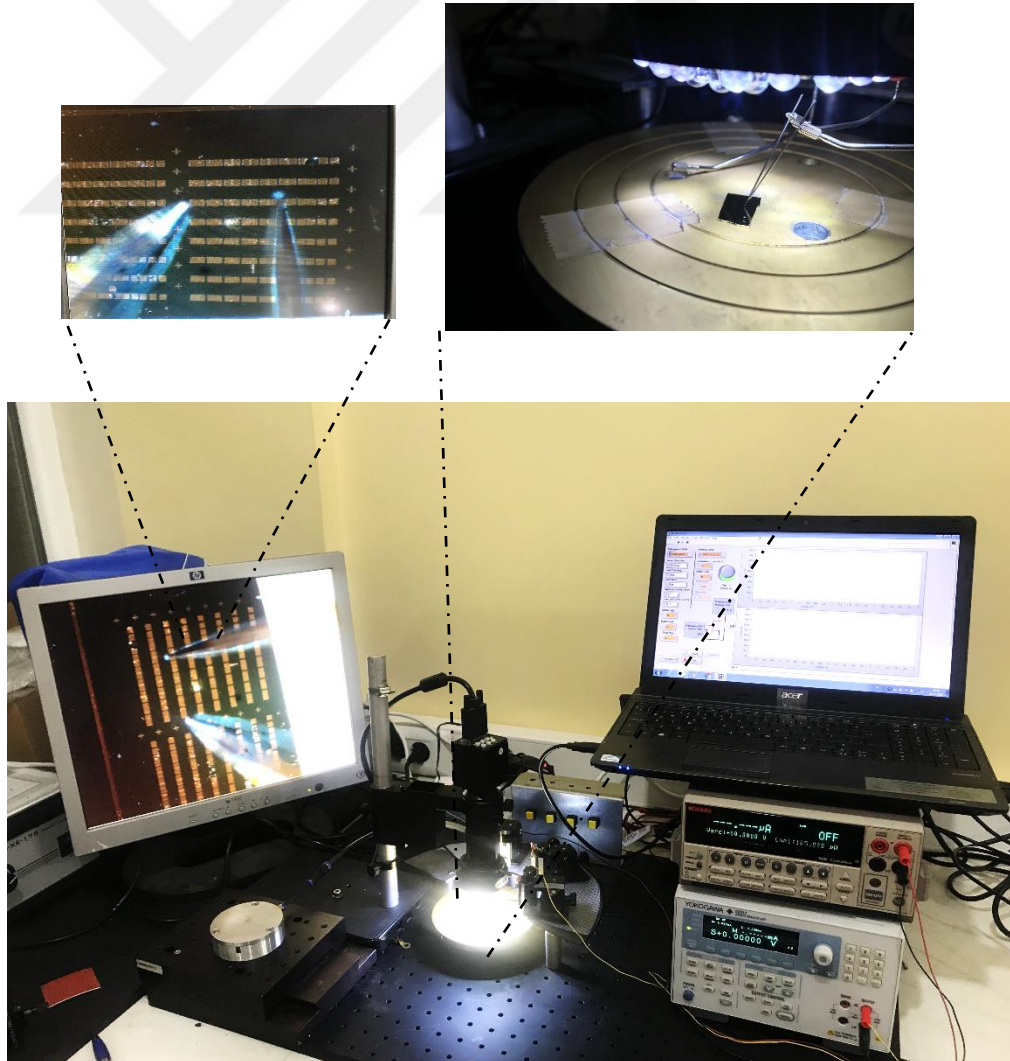
Şekil 40. Aygıt fabrikasyon adımları

Elektriksel Ölçüm Sistemi

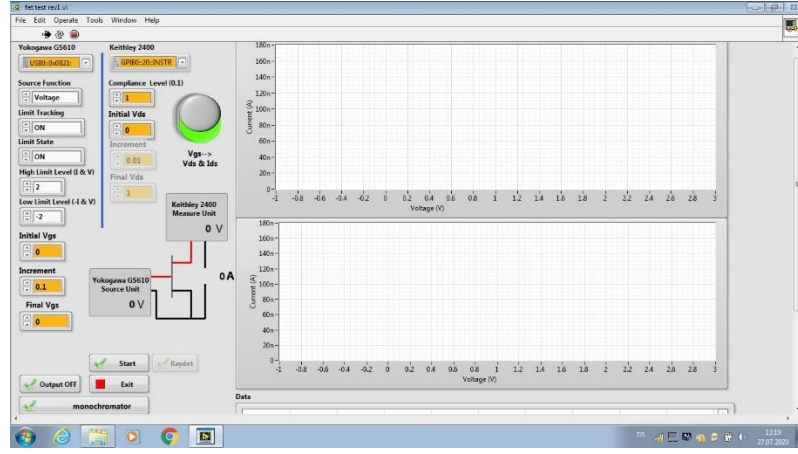
Aygıt fabrikasyonundan sonra FET için üç prob I-V ölçümü, p-n eklem için iki prob I-V ölçümü alınarak aygıt karakterizasyonu yapılmış ve üretilen farklı aygıtların performansı değerlendirilmiştir. Bu ölçümler için kurulan sistemin şematik resmi Şekil 41’de verilmiştir. Sistem kendi imkânlarımız dâhilinde kurulmuştur ve ölçümler atmosfer şartlarında alınmıştır (Şekil 42). Akım, V_{ds} ve arka kapı gerilimi (V_{gs}) ile kontrol edilmektedir. Bunun için Keithley 2400 source meter ve Yokogawa GS610 akım-gerilim kaynağı kullanılmıştır. Bu çalışmada V_{ds} ve V_{gs} ’nin bir fonksiyonu olan akım Şekil 43’te arayüzü görünen Labview programı kullanılarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 41. Şematik olarak aygıt elektriksel ölçüm sistemi



Şekil 42. Üç prob I-V ölçümü için kurulan sistem



Şekil 43. Üç prop I-V ölçümü için hazırlanan Labview arayüz programı

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapılan bu tez çalışmasında, RFMS yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütülen WS_2 , MoS_2 filmleri, MoS_2/WS_2 heteroeklemleri ve WS_2 /gözenekli silisyum yapısının analizlerini yapmak amacıyla optik mikroskop, XPS, XRD, Raman, Raman Haritalama, AFM ve SEM teknikleri kullanılmıştır. Farklı kalınlıkta ve farklı alttaşlara üzerine büyütülen filmlerin analiz sonuçları verilmiştir. Daha sonra büyütülen bu filmler kullanılarak FET ve p-n eklem yapıları üretilmiştir. Üretilen aygıtların elektriksel karakterizasyon sonuçları verilmiştir.

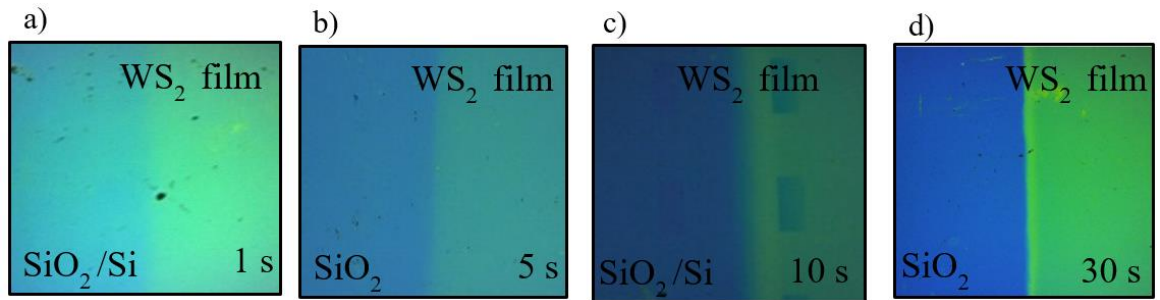
WS_2 İnce Film Tabanlı FET

WS_2 ince filmi RFMS yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütülmüş ve optik mikroskop, SEM, Raman, Raman haritalama, XPS, XRD ve AFM ile filmlerin analizleri yapılmıştır. Büyütülen farklı kalınlıklarda ki WS_2 ince filmlerden FET üretilmiş ve aygıt karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

WS_2 ince film karakterizasyonu

Optik mikroskop görüntüleri

RFMS yöntemi ile farklı sürelerde büyütülen WS_2 ince filmleri ilk olarak optik mikroskop görüntüleri alınmış ve Şekil 44'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere WS_2 filminin büyümediği Si/SiO_2 yüzey ve WS_2 filminin olduğu alan, net olarak kontrast farkı vermektedir. Ayrıca şekilden WS_2 filminin uniform ve sürekli olarak büyüdüğü görülmektedir. Büyütme süresi arttıkça film kalınlığı artmaktadır ve WS_2 filminin olduğu bölgedeki kontrast farkı büyütme süresi ile arttığı görülmektedir.

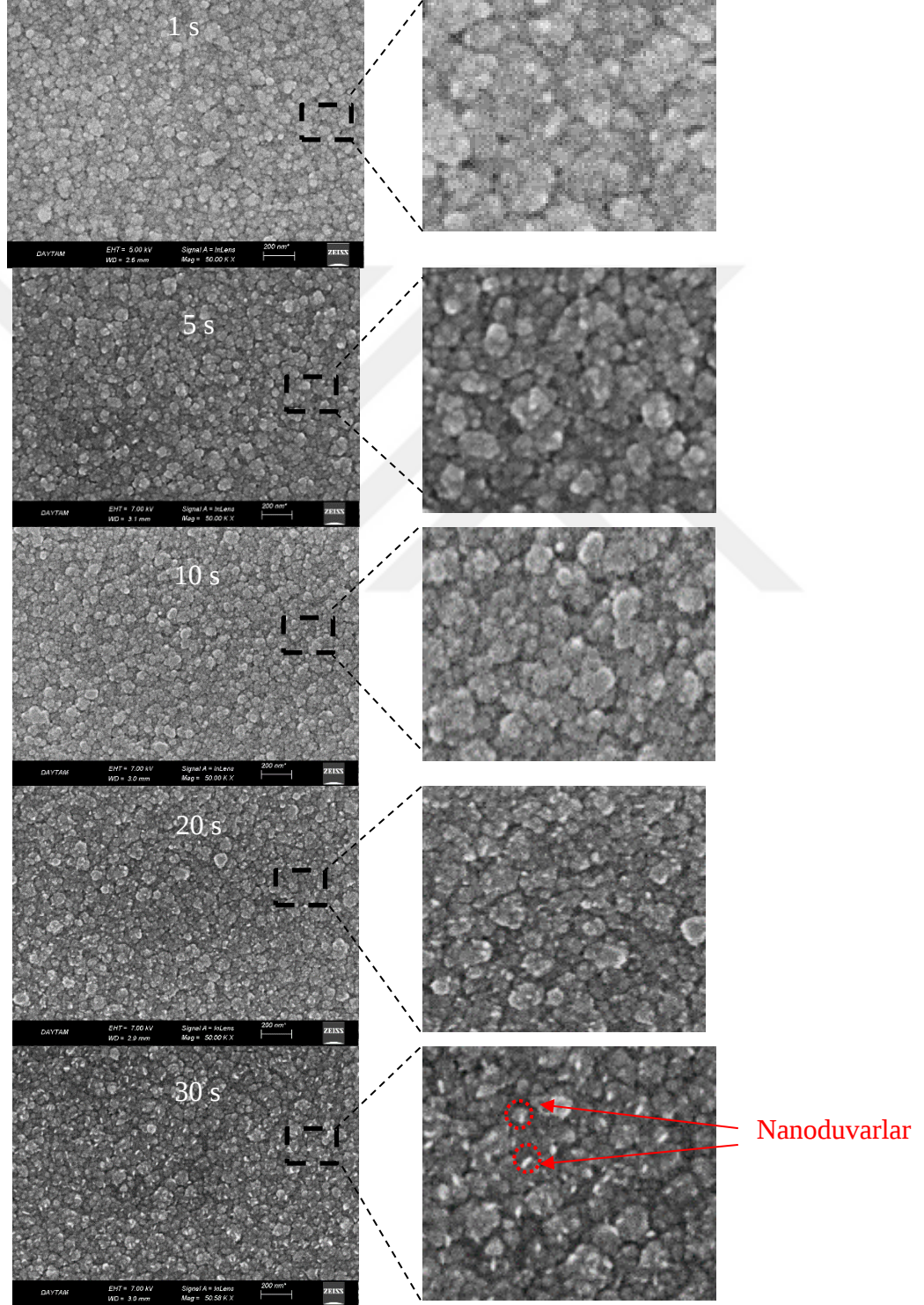


Şekil 44. Farklı sürelerde büyüyen WS_2 filmlerine ait WS_2 filmi ile Si/SiO_2 arayüzünü gösteren optik mikroskop görüntüleri a) 1 s b) 5 s c) 10 s d) 30 s

SEM ölçümleri

RFMS ile farklı kalınlıklarda büyütülen WS_2 filmlerin SEM görüntüleri Şekil 45'te verilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda uygulanan RF gücünün ve büyütme yüzeyinin filmin

morfolojisinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Si/SiO₂ üzerine büyütülen WS₂ filmleri için optimum değer olarak büyütme basıncı 20 mTorr ve büyütme gücü 120 W seçilmiştir. SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi filmler bütün Si/SiO₂ alttaşı üzere homojen ve sürekli olarak büyümüştür. 1, 5, 10 s büyütülen filmlerde yüzey daha pürüzsüz ve düz gözükürken, 20 s büyütülen filmde dikey nano yapıların sebep olduğu çekirdeklenmenin başladığı gözükmemektedir. 30 s büyütülen filmde ise çekirdeklenme yoğunluğu artmaktadır.



Şekil 45. Farklı sürelerde büyütülen WS₂ filmlerin SEM görüntüleri (sağda büyütülmüş SEM görüntüleri) a) 1 s b) 5 s c) 10 s d) 20 s e) 30 s

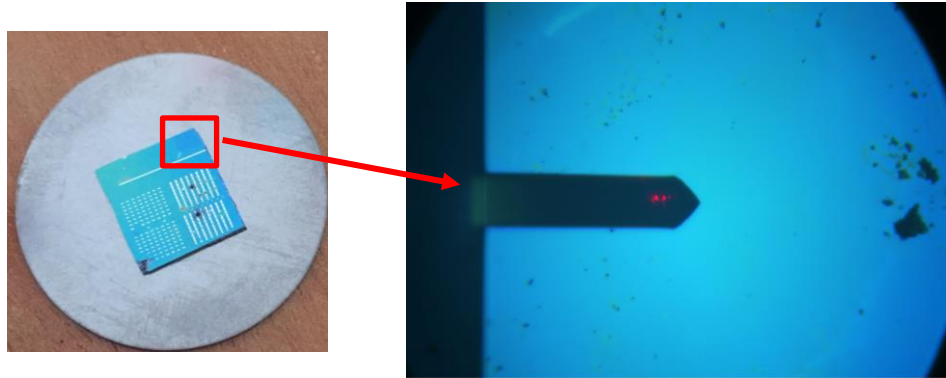
AFM ölçümleri

RFMS yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütülen WS₂ filmlerinin AFM üreticisi olan Nanomagnetics Instrument firması tarafından Tablo 4'te belirtilen parametreler ile kalınlıkları ölçülmüştür.

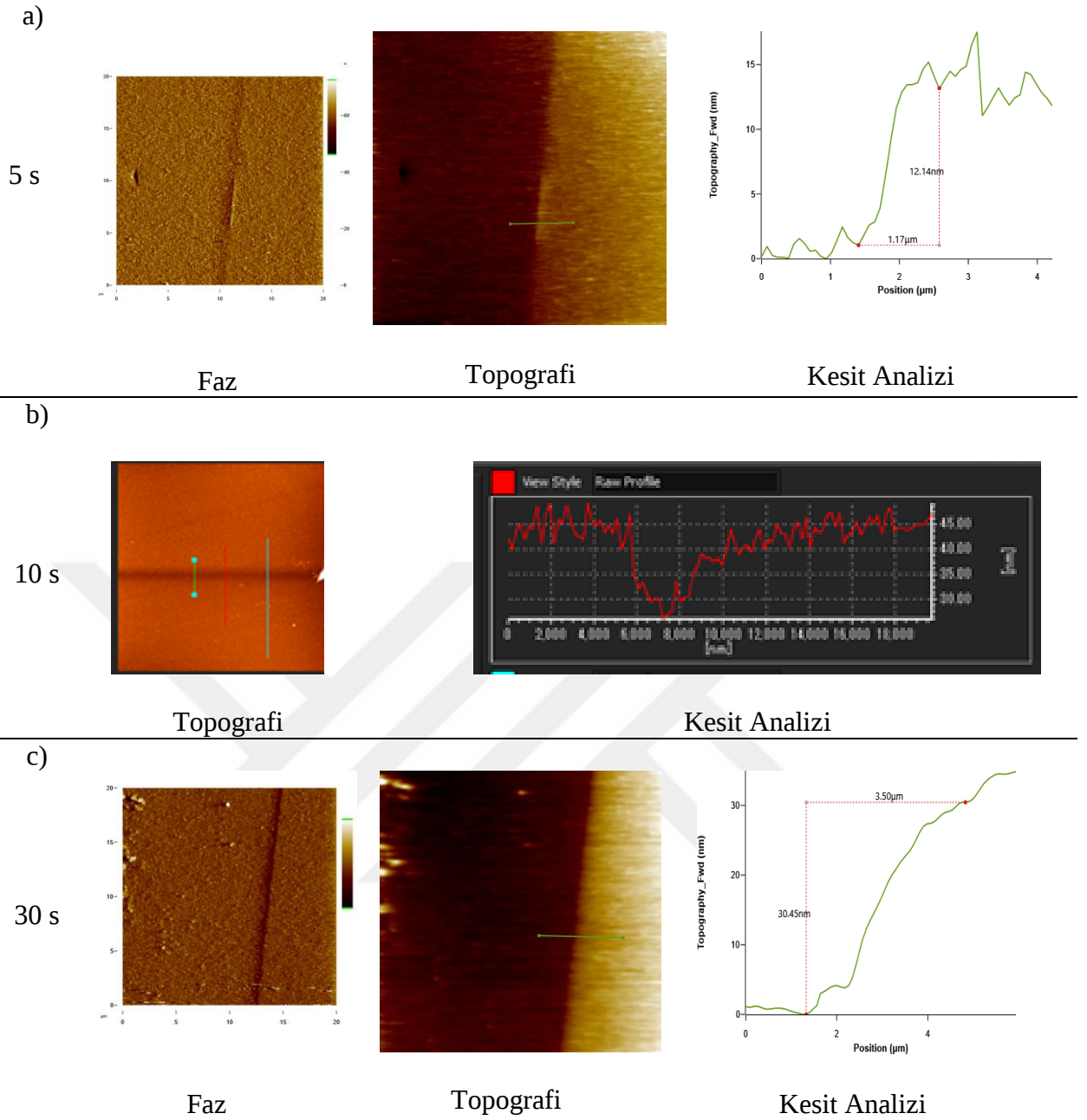
Tablo 4. ezAFM görüntüleme parametreleri

Görüntüleme Parametreleri	
Mod	Dynamic Mod
Çözünürlük (pixels)	256x256
Yazılım versiyonu	ezAFM v6.15.9.39
Cantilever Tipi	ACLA from AppNano
Set RMS	1.2 V _{RMS}
Mikroskop Tipi	ezAFM

Büyütme süresine bağlı olarak WS₂ film kalınlıklarının değiştiğini görmek için yapılan AFM ölçümünde 1 s büyütülmüş filmin Şekil 46'da görüldüğü gibi optik mikroskop görüntüsünden ve çıplak gözle film büyüyen alan ile Si/SiO₂ yüzey ayrımı görülmektedir. Fakat film kalınlığı oldukça ince ve saçtırma yöntemi ile büyütülmesinden kaynaklanan keskin bir kalınlık ölçülebilecek çizgi olmaması, kalınlığın ölçülmesini engellemiştir. Farklı kalınlıklardaki filmlerin topografi görüntüleri, faz görüntüleri ve kesit analizi Şekil 47'de verilmiştir. Filmlerin kalınlıkları sırasıyla yaklaşık olarak 5 s (8,6 nm), 10 s (15 nm) ve 30 s (30 nm) ölçülmüştür. Ayrıca WS₂ filmlerin benzer yüzeylere sahip olduğu ve sürekli film olarak büyüdüğü topografi görüntülerinden görülmektedir.



Şekil 46. 1 s büyütülmüş sürekli WS₂ filminin optik görüntüsü

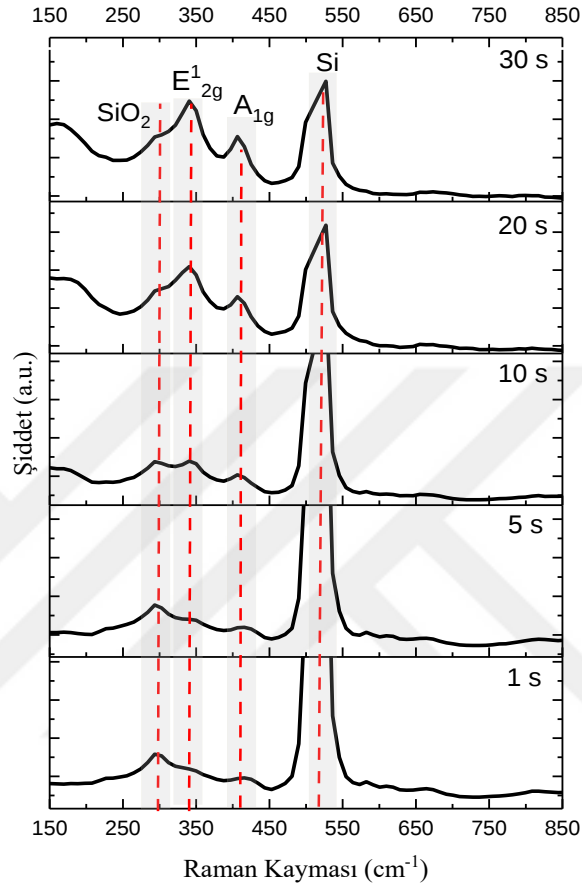


Şekil 47. Farklı sürelerde büyütülmüş WS₂ filmlere ait topografi görüntüleri, faz görüntüleri ve kesit analizi a) 5s b) 10 s c) 30 s

Raman ölçümleri

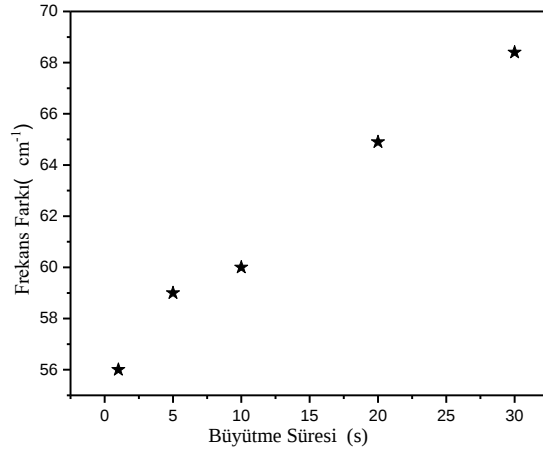
1, 5, 10, 20 ve 30 s sürelerde Si/SiO₂ alttaş üzerine büyütülen WS₂ filmlerinin Raman analizleri yapılmış olup Raman spektrumları Şekil 48’de verilmiştir. WS₂ filmlerinde E_{2g}¹ yani düzlemde dış doğru tungsten ve sülfür atomlarının birbirlerine ters yönde titreştiği mod ve A_{1g} yani düzelmeden dış doğru sülfür atomlarının titreştiği mod olmak üzere iki ana Raman modu bulunmaktadır. WS₂ filminin oluşumunu kanıtlayan 348,8 cm⁻¹ ve 415,7 cm⁻¹’deki pikler sırası ile E_{2g}¹ ve A_{1g} modlarını göstermektedirler, pikler arası frekans farkı ortalama 66,9 cm⁻¹’dir. Alttaştan gelen 298 cm⁻¹’de SiO₂ ve 523 cm⁻¹’de Si piki görülmektedir. Raman spektrumunda tek fazlı WS₂ oluşumunu kanıtlayan WO₃’e ait hiçbir titreşim modu

gözlenmemiştir. 1 ve 5 s'de üretilen filmlerin film kalınlığı çok ince olduğundan Raman spektrumunda E_{2g}^1 modu net olarak görülmemektedir. E_{2g}^1 pikinin içinde 2LA(M) modu olduğu hatta oda sıcaklığında tek tabakalı malzemeler için 2LA(M) modunun E_{2g}^1 modundan daha güçlü olduğu literatürden bilinmektedir (Kolobov and Tominaga 2016). Bu durum bizim elde ettiğimiz sonuçları doğrulamaktadır.



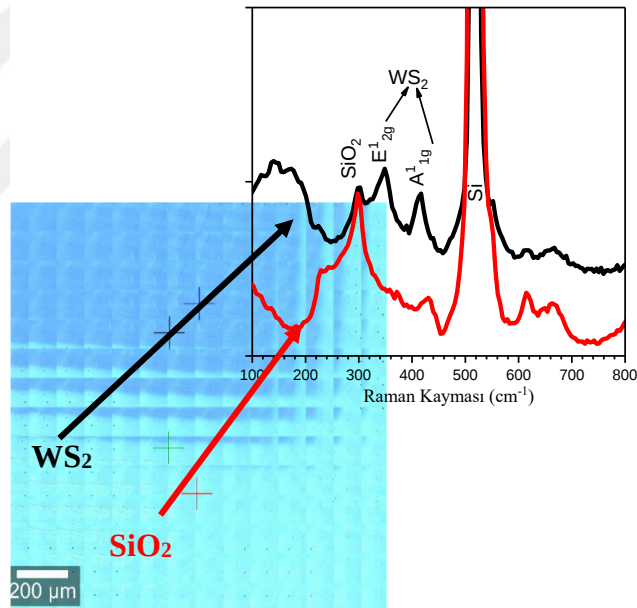
Şekil 48. Farklı sürelerde büyütülen WS₂ filmlerin Raman ölçümleri

Kalınlığa bağlı üretilen filmlerin Raman analizinden Şekil 49'da görüldüğü üzere film kalınlığı arttıkça frekans farkı ($\Delta w = A_{1g} - E_{2g}^1$) 56 cm⁻¹' den 68,4 cm⁻¹'e doğru artmıştır. A_{1g} ve E_{2g}^1 pik şiddetlerinin artan kalınlıkla arttığı görülmektedir. Ayrıca film kalınlığı daha çok E_{2g}^1 pikinde kaymaya neden olmuştur. Bununla birlikte WS₂ ince filmlerin Raman spektrumlarının kalınlıkla çok fazla değişmediği de bilinmektedir (Liang *et al.* 2018).



Şekil 49. WS₂ filminin büyütme süresine bağlı frekans farkı (cm⁻¹) grafiği

RFMS yöntemi ile WS₂ filmin sürekli olarak büyüdüğünü göstermek için Si/SiO₂ alttaş üzerine kalınlığa bağlı olarak büyütülen filmlerden 5 s büyütülmüş WS₂ filmi ile film büyümeyen arayüzde geniş alanda (1,5x1,5 mm²) Raman haritalama yapılmış ve Şekil 50’de verilmiştir.

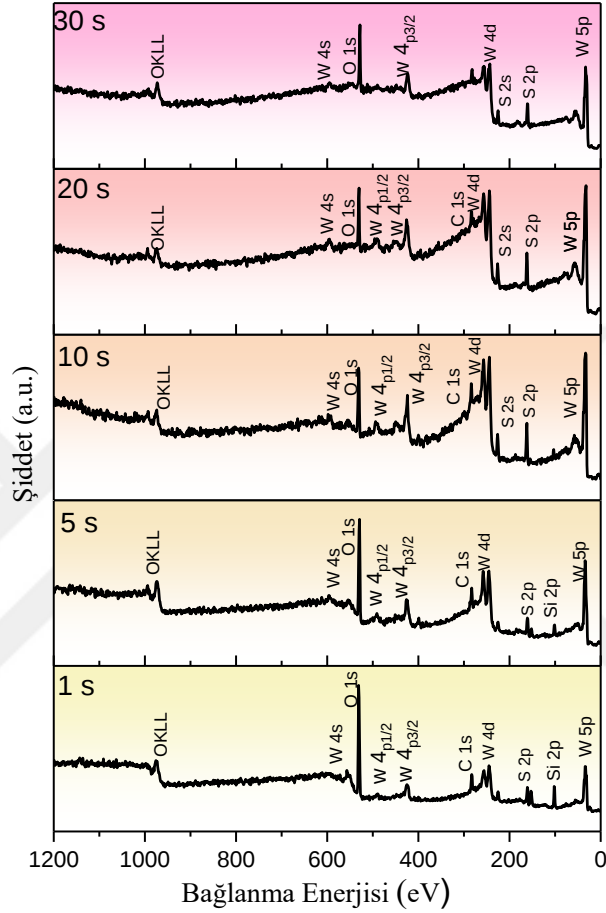


Şekil 50. 5 s büyütülmüş WS₂ filmi için WS₂ ince film ile Si/SiO₂ arayüzeyinde geniş alan Raman haritalama

Alttaş (Si/SiO₂) ve WS₂ filmi arasında görülen kontrast farkından da anlaşılacağı üzere alttaşın bir kısmı WS₂ filmi ile kaplanmamıştır. Şekil 50’de SiO₂ alttaş ve sürekli olarak büyüyen WS₂ filmini göstermektedir. Raman haritalamasından yüzeyde iki renkli bölge olduğu görülmektedir. Mavi bölge WS₂ filmini gösterirken, yeşil bölge Si/SiO₂ alt tabakasını göstermektedir. Şeklin iç kısmında görüldüğü gibi her iki bölge için Raman spektrumları verilmiştir. Mavi bölgede SiO₂ piki ile karşılaştırıldığında WS₂ piki baskınken; yeşil bölgede SiO₂ piki baskındır ve WS₂’ye ait herhangi bir titreşim modu bulunmamaktadır.

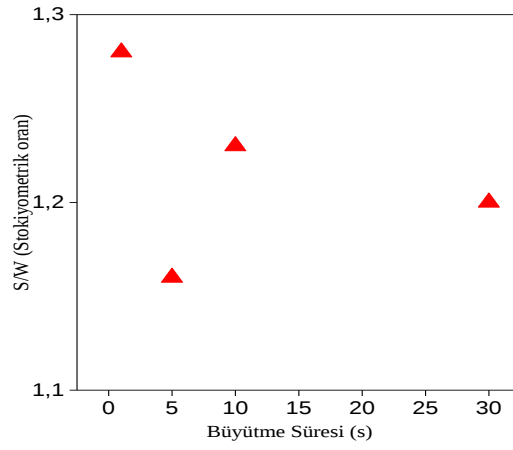
XPS ölçümleri

Farklı sürelerde büyütülen sürekli WS₂ ince filmlerinin kimyasal birleşimini belirlemek için XPS ölçümleri alınmıştır ve 1, 5, 10, 20 ve 30 s büyütülmüş WS₂ filmlerin XPS genel spektrumları Şekil 51’de verilmiştir. Grafik üzerindeki piklerin hangi elemente ait olduğu belirtilmiştir.



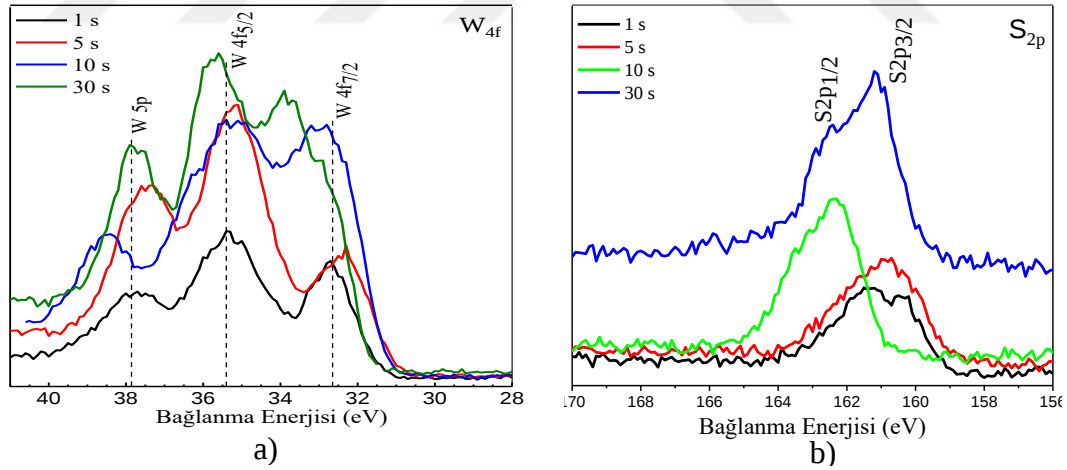
Şekil 51. Farklı sürelerde büyütülen WS₂ filminin XPS genel spektrumu

XPS genel spektrumlarında analizler yüzeyden ortalama 10 nm derinlikte yapılmaktadır. 1 ve 5 s büyütülen filmlerin kalınlığı 10 nm’den düşük olduğundan alttaşa ait pikler analizde görülmektedir. Yapılan analizde W (tungsten), O (oksijen), S (sülfür) ve C (karbon) elementlerinden başka bir element görülmemiştir. W ve S elementleri WS₂ filminden gelirken, C ve O’nun yüzeyin kirlenmesinden kaynaklanmaktadır. Oksijen pikinin düşük kalınlıklarda fazla olduğu görülmektedir. Bu durum Si-WS₂ arayüzeyinde SiO₂ olmasından kaynaklanmaktadır. Büyütülen WS₂ ince filmlerinin XPS genel spektrumlarından yüzey elementel analizi yapılmış ve elementlerin S/W stokiyometrik oranları Şekil 52’de verilmiştir ve bu oranın 1,15 ile 1,3 arasında değiştiği görülmüştür. Bu bağlamda filmlerin sülfürce fakir olarak büyüdüğü gözükmemektedir. Film büyütme süresi arttıkça sülfür eksikliği artmıştır.



Şekil 52. Sülfür atomunun tungsten atomuna oranının büyütme süresi ile değişimi

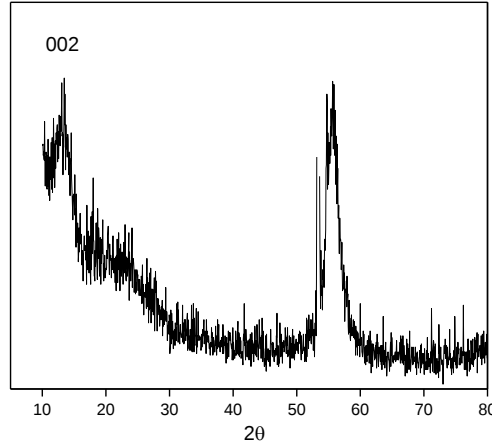
Farklı kalınlıklarda üretilen WS₂ ince filmlerin oksidasyon analizlerini yapabilmek için yüksek çözünürlüklü W_{4f} ve S_{2p} spektrumları aşağıda verilmiştir. Şekil 53a'da WS₂ ince filmlerin büyütme süresine bağlı W_{4f} XPS analizleri verilmiştir. Grafikte metalik W görülmemektedir. Oksidik W ile birlikte üç pik görülmektedir. Düşük enerjideki WS₂ filminin W⁴⁺ oksidasyon durumunu gösteren ilk iki pik 32.7eV'de W_{4f_{5/2}} ve 35.4eV'de W_{4f_{7/2}} pikleridir. Bu değerlerdeki artan kalınlıkla meydana gelen kaymalar W⁶⁺ oksidasyon durumuna geçildiğini göstermektedir. Şekil 53b'de farklı sürelerde büyütülen WS₂ ince filmlerin S_{2p} bağlanma enerjileri gösterilmektedir.



Şekil 53. Üretilen WS₂ ince filmlerin büyütme süresine bağlı a) W_{4f} XPS analizleri b) S_{2p} XPS analizleri

XRD analizi

WS₂ filminin kristal yapı özelliklerini araştırmak amacıyla küçük geliş açısı yöntemi kullanılarak alttaş etkileri azaltılarak XRD ölçümleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 54'te ölçüm sonuçları verilmiştir. WS₂ ince filmi için (002) $2\Phi=13,4^\circ$ 'te ve (110) $2\Phi=55,15^\circ$ 'de gözlenmiştir. (002) pikinin gözlenmesi aslında büyütülen örneğin c-eksenli alttaşa paralel olarak büyüdüğünü göstermektedir (Hussain *et al.* 2016).



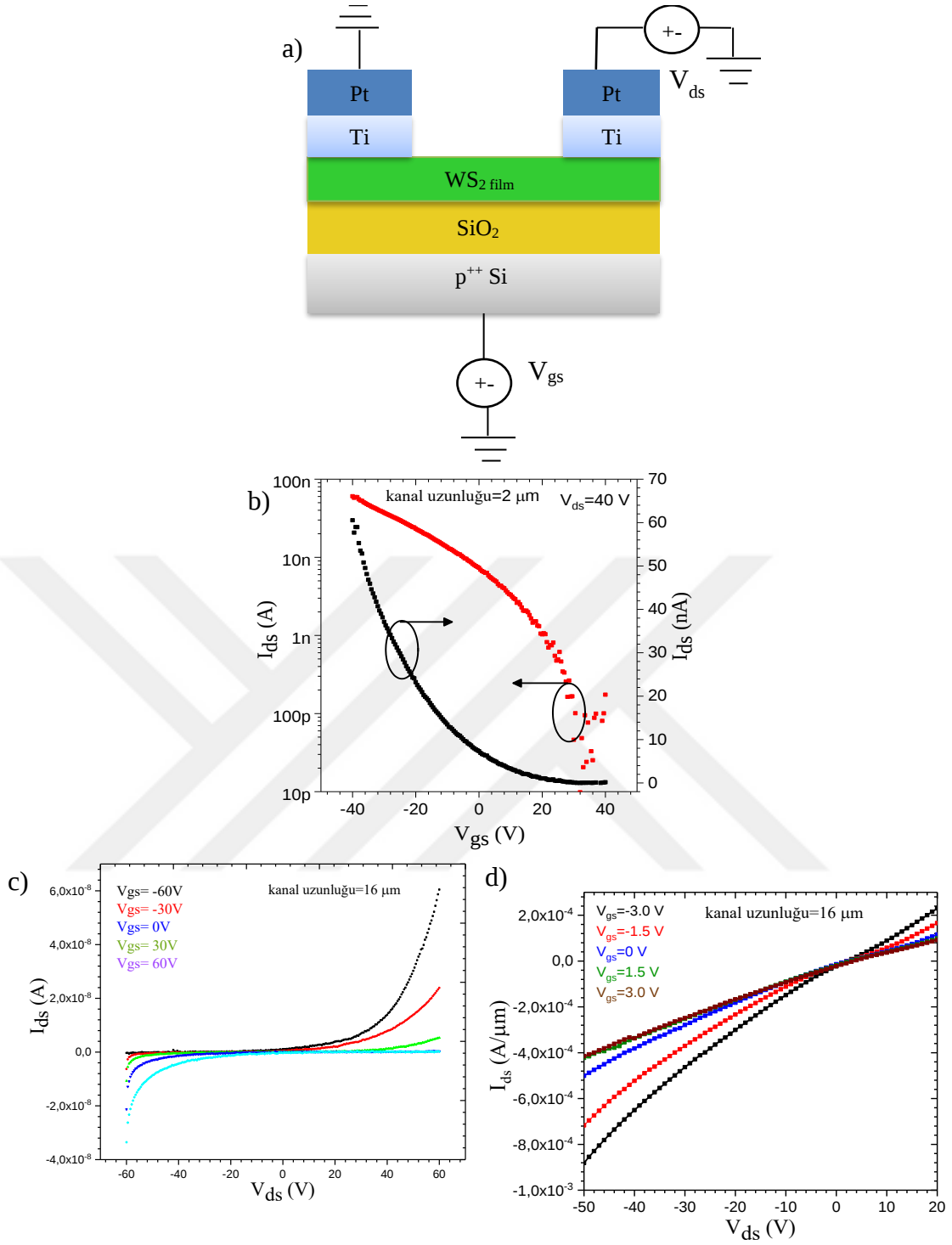
Şekil 54. 5 s büyütülmüş WS₂ ince film için XRD ölçümü

WS₂ tabanlı FET'lerin elektriksel karakterizasyonu

RFMS yöntemi ile farklı sürelerde büyütülmüş WS₂ sürekli filmlerinin yarıiletken tabaka ve SiO₂'nin yalıtkan tabaka olarak kullanıldığı FET'lerin elektriksel karakterizasyonu yapılmış, transfer ve çıkış eğrileri verilmiştir. Transfer ve çıkış eğrileri kullanılarak FET'e ait özellikler hesaplanmıştır. Farklı kalınlıklarda büyütülen WS₂ ince filmlerine göre FET özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı sürelerde büyütülen filmlere göre kontak direnci grafiği çizilmiş ve film kalınlığının kontak direnci üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Kanal uzunluğunun etkisini değerlendirebilmek için farklı kanal uzunluklarına sahip FET'lerin transfer eğrisi elde edilmiştir.

WS₂ tabanlı FET karakterizasyonu, WS₂ yarıiletken film üzerinde bulunan akaç ve kaynak elektrotları (Ti/Pt) ile Al kaplı Si arka kapı olarak kullanılarak yapılmıştır. WS₂ tabanlı FET'e ait şematik resim, transfer ve çıkış eğrileri Şekil 55'de verilmiştir. Şekil 55a'da görüldüğü gibi Al arka kontağa sahip arka kapılı FET omik kontak olabilmesi için Ti/Pt (5 nm/50 nm) kullanılarak akaç ve kaynak elektrotlar oluşturulmuştur. 1 s büyütülmüş WS₂ yarıiletkeni kullanılarak üretilmiş FET'in transfer eğrisi logaritmik ve lineer ekseninde verilmiştir (Şekil 55b). FET'in kanal uzunluğu 2 µm, kanal genişliği 150 µm'dir. V_{ds} gerilimi 40 V'da sabit tutularak V_{gs} eksenini -50V ile 50V arasında taranmıştır. Transfer karakteristiğinden açma/kapama oranının yaklaşık 10⁴ olduğu ve kapalı durum akım seviyesinin pA seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yine transfer karakteristiğinden WS₂ tabanlı FET'in V_{ds} yüksek voltajda olduğu için p-tipi davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum genellikle n-tipi davranış sergileyen WS₂ film için ilginç bir sonuçtur (Kang *et al.* 2015). P-tipi/n-tipi iletkenlik değişimi birkaç sebepten meydana gelmektedir. Bunlardan biri kontaklar için kullanılan metalin iş fonksiyonunun polarite değişimini etkilemesidir (Chuang *et al.* 2014). Diğer bir sebep filmde bulunan kusurlar ve sülfür eksikliğidir. Sülfür eksikliğinin valans bandı 300 meV ve 120 meV

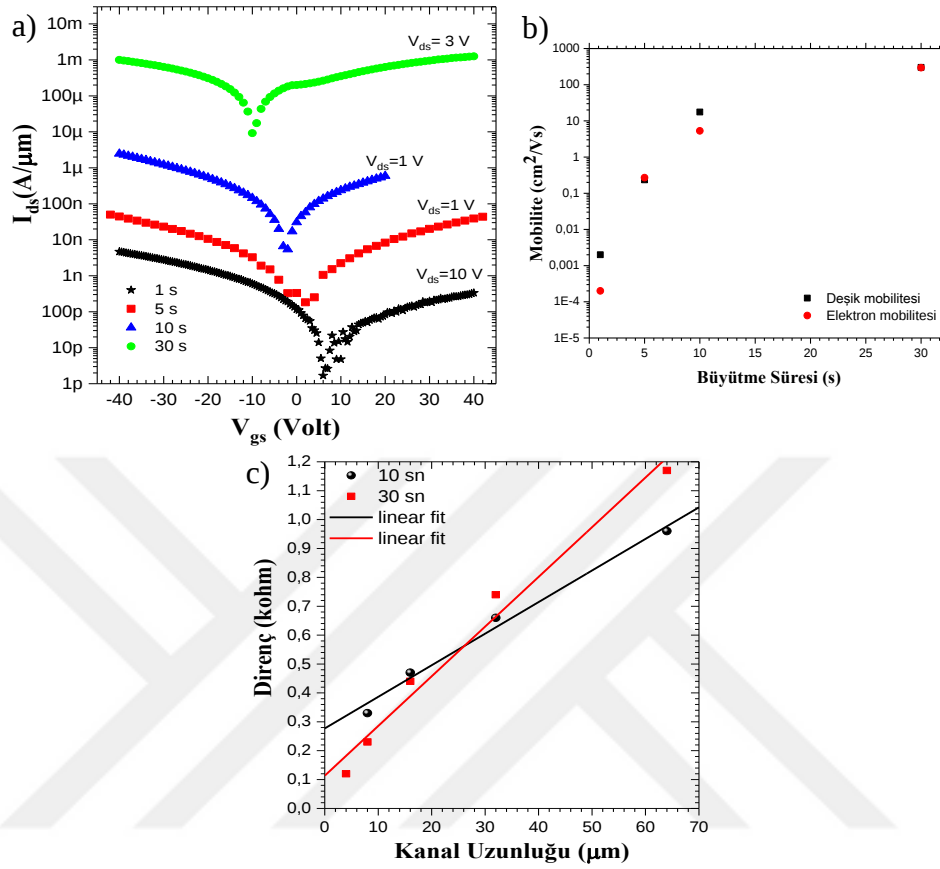
aşağı kaydırdığı bilinmektedir (Kastl *et al.* 2019). Beklenmedik p-tipi davranışın sebebinin sülfür eksikliği olduğu düşünülmektedir. Çıkış karakteristiği -60V ile 60V arasında V_{ds} taranarak elde edilmiştir. V_{gs} gerilimi ise -60V ile 60V arasında 30V adımlarla uygulanmıştır (Şekil 55c). Çıkış karakteristiğinden de açıkça görüldüğü üzere arka kapıya uygulanan V_{gs} gerilimi ile I_{ds} akımı kontrol edilebilmektedir. 1 s büyütülmüş WS_2 tabanlı FET Ti/Pt kontakların düşük bariyer yüksekliğine sahip Schottky davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu davranış 2B FET’lerde genel olarak gözlenmektedir (Yang *et al.* 2018). Ayrıca 10 s büyütülmüş WS_2 tabanlı FET çıkış karakteristiği -50V ile 20V arasında V_{ds} taranarak ve V_{gs} gerilimi -3V ile 3V arasında 1,5V’luk adımlarla taranarak elde edilmiştir (Şekil 55d). Büyütme süresine bağlı olarak artan film kalınlığı ile kontakların elektriksel özellikleri iyileşmiştir. Çıkış karakteristiğinden 10 s WS_2 büyütülmüş FET’de 1 s büyütülmüş WS_2 FET’e göre daha düşük kontak direnci olduğu görülmektedir. Bu nedenle 10 s büyütülmüş WS_2 FET çıkış karakteristiğinden 0 V civarı lineer davranış gözlenmiştir.



Şekil 55. Ti/Pt kontaklara sahip WS₂ tabanlı FET'in şematik resmi b) 1 s büyütülmüş WS₂ tabanlı FET'in transfer c) çıkış eğrisi d) 10 s büyütülmüş WS₂ tabanlı FET çıkış eğrisi

WS₂ sürekli film kullanılarak tek bir litografi adımı ile üretilen FET'lerin kalınlığa bağlı transfer karakteristiği 1 s, 5 s, 10 s ve 30 s büyütülmüş filmler için Şekil 56a'da verilmiştir. Ölçümler düşük V_{ds} voltajlarında (1-10 V) alınmıştır. Bu nedenle Şekil 56a'da verilen transfer eğrisinden görüldüğü gibi bütün WS₂ filmler pozitif ve negatif kapı voltajı şartlarında ambipolar olarak yani hem elektron ve hem de deşikler için çalışmaktadır. Film kalınlığı arttıkça açma ve kapama akım seviyelerinin her iki polarite için arttığı görülmektedir. Ayrıca 1 s büyütülmüş WS₂ filmde p-tipi baskın polarite görülmektedir. Bu durumun sebebi 1 s

büyütülmüş filmde V_{ds} voltajının 10 V yani diğer filmlerden yüksek olmasıdır. Polaritenin V_{ds} gerilimi ile değiştiği yapılan ölçümlerden gözlenmiştir. FET yüksek V_{ds} voltajlarında unipolar davranış gösterirken düşük V_{ds} voltajında ambipolar davranış sergilemiştir.



Şekil 56. RFMS yöntemi ile 1s, 5 s, 10 s ve 30 s büyütülmüş sürekli WS_2 film tabanlı FET'in a) transfer eğrisi b) büyütme süresine bağlı mobilite grafiği c) 10 s ve 30 s filmler için kanal uzunluğuna göre direnç grafiği

Büyütme süresine bağlı deşik ve elektron için mobilite değerleri Şekil 56b'de verilmiştir. Artan kalınlıkla mobilite değeri artmıştır ve deşik ve elektronlar için benzer mobilite değerleri gözlenmiştir. Kontak direncini belirlemek için TLM yöntemi kullanılmıştır ve lineer fit yapılmıştır. 10 s ve 30 s büyütülmüş WS_2 filmler için kanal uzunluğuna direnç grafiği Şekil 56c'de verilmiştir. Düşük kanal uzunluklarında kontak direnci (R_c) 10 s WS_2 FET (138,5 Ω), 30 s WS_2 FET'den (56,7 Ω) daha yüksektir. Kalınlık arttıkça kontak direnci yaklaşık üç kat azalmıştır. Bunlara ek olarak 10 s ve 30 s büyütülmüş WS_2 örnekler için tabaka direnci (R_s) yaklaşık 258 Ω/cm ve 164 Ω/cm 'dir. Transfer uzunlukları, 10 s ve 30 s büyütülmüş WS_2 numuneleri için sırasıyla 33,0 μm ve 126,7 μm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler 32 μm daha küçük kanal uzunlukları için I-V ölçümlerinin güvenilirliğini göstermektedir. Son olarak, kontak öz direnci (p_c), 10 s ve 30 s WS_2 için sırası ile $2,63 \times 10^{-2} \Omega cm^2$ ve $2,8 \times 10^{-3} \Omega cm^2$ değerleri elde edilmiştir. 30 s büyütülmüş WS_2 'nin kontak öz direnci, 10 s büyütülmüş WS_2 'nin kontak öz direncinden 10 kat daha düşüktür.

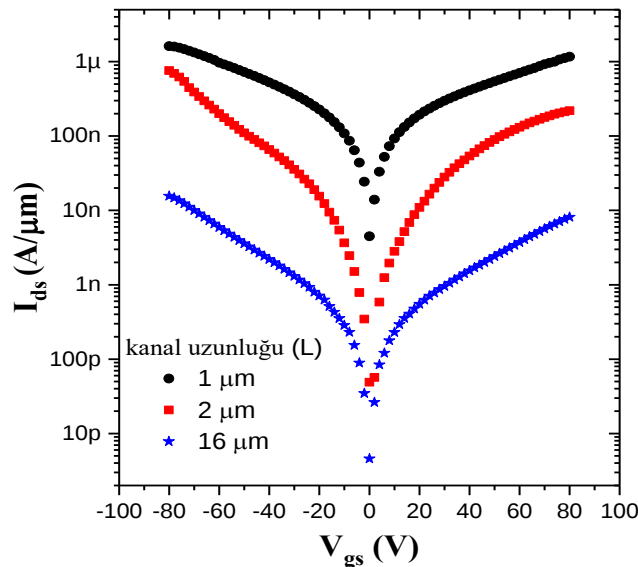
Herbir farklı kalınlıklarda WS₂ sürekli film için elektron ve deşik için mobilite değeri (μ), eşik değeri (V_{th}) değeri, transfer iletkenliği (g_m) ve $I_{açma}/I_{kapama}$ hesaplanmış ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. WS₂ tabanlı FET'e ait aygıt özellikleri

Süre (s)	Özellik						
	μ_p (cm ² /Vs)	$g_{m,p}$	$V_{th,p}$ (V)	μ_n (cm ² /Vs)	$g_{m,n}$	$V_{th,n}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$
1	0,002	$1,2 \cdot 10^{-9}$	8,5	0,0002	$1,4 \cdot 10^{-10}$	-16	$\sim 10^4$ - 10^5
5	0,235	$2,5 \cdot 10^{-8}$	14,9	0,27	$2,9 \cdot 10^{-8}$	-19	$\sim 10^4$ - 10^5
10	17,6	$1,9 \cdot 10^{-6}$	12	5,3	$4,1 \cdot 10^{-7}$	-3,9	$\sim 10^4$ - 10^5
30	301,6	$3,2 \cdot 10^{-5}$	10	295	$3,2 \cdot 10^{-5}$	-0,19	$\sim 10^4$ - 10^5

V_{th} voltajı transfer eğrisinde FET'in iletimde olduğu bölgede lineer ekstrapolasyon yapılarak p- ve n-tipi için ayrı ayrı belirlenmiştir. FET'in p ve n tarafında yaklaşık olarak benzer eşik voltaj (V_{th}) değerleri gözlemlenmiştir. V_{th} değerlerinin n-tipi için artan kalınlıkla azaldığı görülmektedir. Mobilite değerinin hesaplanmasında kullanılan iletkenlik değerleride p ve n-tipi için ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 5'te verilmiştir. Mobilite değerinin artan kalınlıkla arttığı ve 0,002-301,6 cm²/Vs arasında olduğu görülmüştür. Bu değerler literatüre göre kabul edilebilir değerlerdir. 30 s büyütülmüş filmde literatüre göre oldukça yüksek 301,6 cm²/Vs mobilite değeri görülmüştür, bu değer oluşun nanoduvvarların kanal mobilitesine olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca düşük kalınlıklarda ki yüksek eşik voltaj değerlerinin ve düşük mobilite değerlerinin film büyütülürken alttaş sıcaklığının yüksek olmasından dolayı SiO₂ yalıtkan tabakasının etkilenmesinden ve kontak direncinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kanal uzunluğunun FET üzerinde etkisini incelemek amacıyla RFMS yöntemi ile 5 s büyütülmüş WS₂ film FET transfer eğrisi 1 μ m, 2 μ m ve 16 μ m gibi farklı kanal uzunlukları için çizilmiştir (Şekil 57).



Şekil 57. RFMS yöntemi ile 5 s büyütülmüş WS₂ sürekli film kullanılarak üretilen FET'in farklı kanal uzunlukları için transfer eğrisi

Açma ve kapama akım seviyelerinin kanal uzunluğu azaldıkça arttığı yukarıdaki grafikten görülmektedir. Bu durum kanal uzunluğu azaldıkça kanalda oluşan elektrik alanın meydana getirdiği artan taşıyıcı hızından meydana gelmektedir. Bu artan taşıyıcı hızı mobilite değerlerini her bir kanal genişliği için neredeyse aynı tutarak akım değerlerini kanal uzunlukları ile ters orantılı bir şekilde artırdığı görülmektedir. Mobilite değerlerinde yaklaşık 2×10^{-3} - $7,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arası değişmektedir. Bu da kanal uzunluğunun mobilite formülüne göre zaten mobilite değeri üzerinde çok büyük bir fark yaratmadığı bilinmektedir. Şekil 57, bunu teyit etmektedir.

WS_2 film tabanlı FET performanslarını değerlendirmek için Tablo 6'da çeşitli yöntemlerle büyütülmüş WS_2 filmlerden üretilen FET'lerin performansları verilmiştir. Tablo incelendiğinde FET'lerin $0,3$ - $239 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arası mobilite gösterdiği ve $I_{\text{Açma}}/I_{\text{Kapama}}$ oranının minimumun 10^3 , maksimum 10^8 olduğu tablodan görülmektedir. Bazı ayrılma yöntemi ile elde edilmiş yüksek kaliteli filmler kullanılarak üretilen FET'lerde iyi aygıt performansları görülmektedir (Yang *et al.* 2017), fakat bu çalışmalar laboratuvar çalışmaları ile sınırlı kalmıştır. Filmlerin büyük alan büyütülmesine yönelik yapılan çalışmalar mevcuttur. Örneğin CVD yöntemi ile büyük alan, fakat üçgen pulcuklara sahip çalışmalar yapılmıştır. $0,28$ - $0,46 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arası mobilite değeri elde edilmiştir (Zhang *et al.* 2013). Yaptığımız literatür araştırmalarına göre saçırtma yöntemi kullanılarak tek adımda WS_2 büyütülerek FET üretilmiş bir çalışma bilginiz dahilinde mevcut değildir. Yalnız bir çalışmada WO_3 saçırtma yöntemi ile kaplanmış daha sonra CVD ile sülfürlenmiştir, mobilitesi 17 - $38 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ arası olan FET'ler üretilmiştir (Hussain *et al.* 2016). Bu tez çalışması kapsamında üretilen WS_2 tabanlı FET'lerde literatür ile karşılaştırıldığında oldukça iyi aygıt performansları elde edilmiştir.

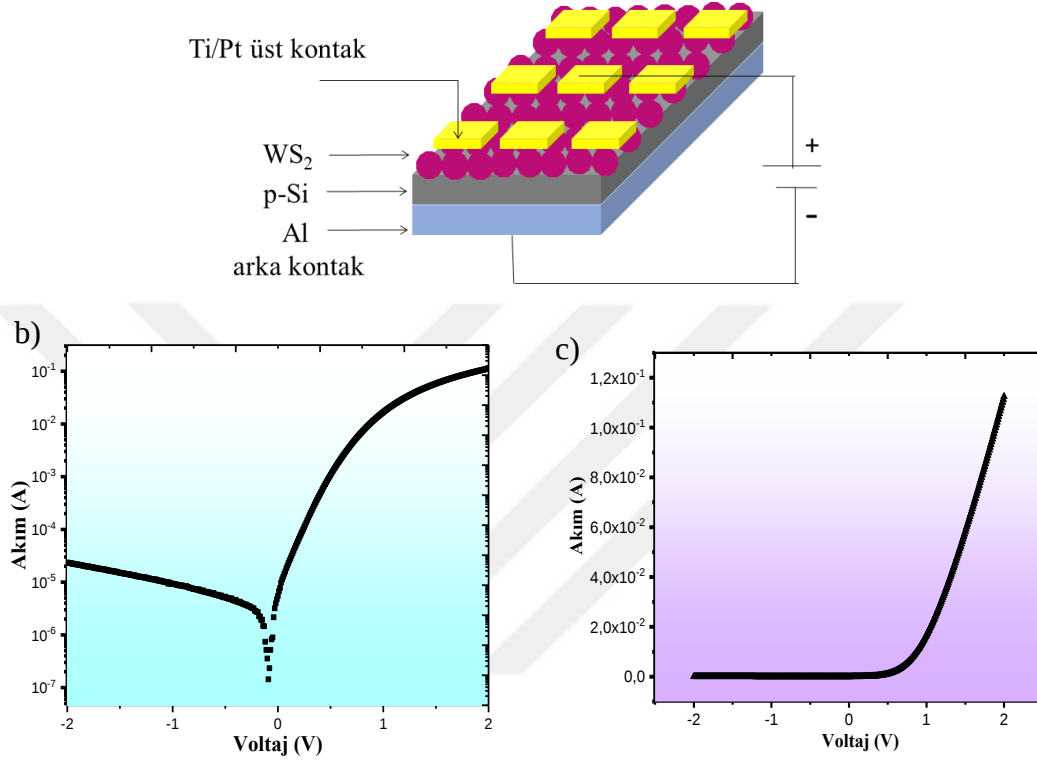
Tablo 6. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş büyük alan WS_2 film tabanlı FET'lerin karşılaştırması

Yöntem	Alan etkili mobilite (cm^2/Vs)	$I_{\text{Açma}}/I_{\text{Kapama}}$ oranı	Referans
Tek-adım saçırtma	0,002-301	10^4	bu çalışma
saçırtma	784 (Hall) (25 ve 160 nm)	-	(Yarbrough <i>et al.</i> 2019)
WO_3 saçırtma/CVD	17-38	10^4	(Hussain <i>et al.</i> 2016)
W saçırtma/sülfürleme	-	-	(Orofeo <i>et al.</i> 2014)
ALD	3,9	-	(Song <i>et al.</i> 2013)
CVD	234	10^8	(Liu <i>et al.</i> 2014)
CVD	0,3	10^3	(Jia <i>et al.</i> 2019)
CVD	0,46(e)-0,28(h)	10^2	(Zhang <i>et al.</i> 2013)
ayrılma	239	10^5	(Yang <i>et al.</i> 2017)

WS_2/Si p-n Eklem Elektriksel Karakterizasyonu

RFMS yöntemi ile 10 s büyütülen WS_2 filmi ile p-n eklem yapısı oluşturulmuş elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. p-n eklemi oluşturulurken p-Si cilalı olmayan yüzeyine Al kaplanmış,

omik kontak olması için N₂ gaz ortamında 540°C’de 3 dakika tavlannmıştır. Daha sonra p-Si cıvalı tarafı üzerine eklerde büyüme parametreleri verilen WS₂ filmi 10 s kaplanmıştır. Üst kontaktlar litografi yöntemi ile oluşturulup, Ti/Pt (5 nm/50 nm) ile metal kaplanmıştır. Elde edilen p-n eklem yapısının şematik resmi Şekil 58a’da verilmiştir. Bu yapıda kontaktlardan biri Al’dan diğeri ise Ti/Pt kontaktan alınmış ve tüm ölçümler atmosfer şartlarında ve oda sıcaklığında alınarak I-V grafiğı logaritmik ve lineer ekseninde elde edilmiştir (Şekil 58b-c).



Şekil 58. WS₂/Si heteroekleminin a) şematik gösterimi b) logaritmik ve c) lineer ekseninde I-V eğrisi

Şekil 58’de görüldüğü gibi heteroeklemin I-V grafiğı -2V ile 2V arasında alınmıştır. Logaritmik I-V eğrisinden heteroeklem doğrultma oranı 10⁵ olan diyot benzeri davranış sergilediğı görülmektedir. Ters gerilimde satüre olmuş I-V eğrisi heteroeklemde daha az arayüz etkilerinin olduğunu göstermektedir. Kaçak akımı 0,2V’da 2.28×10⁻⁶ A olarak gözlemlenmiştir. Akımın hızla artmaya başladığı açma gerilimi 0,5 V’tur.

WS₂/Si heteroeklemine metal yarıiletken kontaktlarda olduğu gibi yük taşınmasına esas olarak azınlık yük taşıyıcıları neden olmaktadır. Fakat bu çalışmada heteroeklem Si yüksek oranda katkılı olduğu için tek taraflı Schottky eklem gibi çalışmaktadır. Termiyonik emisyon (TE) akımı eşitliğı idealite faktörü (*n*) ve bariyer yüksekliğini (Φ_b) hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu denklem için logaritmik I-V eğrisinin eğimi kullanılmaktadır. WS₂/p-Si ekleminden geçen akım TE teorisine göre aşağıdaki 9 nolu denkleme göre hesaplanır;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{KT}\right)\right] \quad (9)$$

Burada, q: elektronik yük, V:uygulanan voltaj, T:sıcaklık, k:boltzman sabiti, n: idealite faktörü, I_0 : ters satürasyon akımıdır. İdealite faktörü (n), In (I)-V eğrisinin ileri sapma lineer bölgesinden 10 nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (10)$$

Diğer bir önemli parametre olan bariyer yüksekliği (Φ_b) aşağıda ki 11 nolu denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (11)$$

A: alan ve A^* : efektif Richardson sabiti ($32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ Si için).

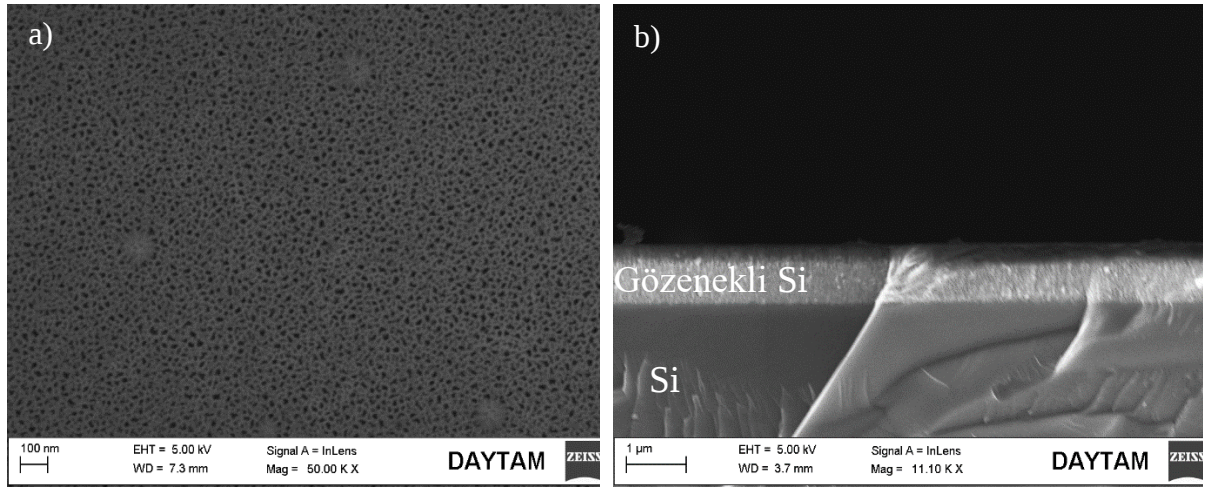
Yukarıdaki denklemlere göre $\text{WS}_2/\text{p-Si}$ heteroekleminin idealite faktörü ve bariyer yüksekliği sırası ile yaklaşık 5,7 ve 0.48 eV olarak hesaplanmıştır. Seri dirence sebep olan arayüz tabakası, yüzey durumu ve üretim hatalarında meydana gelen kusurlar idealite faktörünün 1'den büyük olmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca termiyonik emisyon dışında başka taşıma mekanizmalarının da heteroeklemden aktif olduğunu söyleyebiliriz.

WS_2 /Gözenekli Silisyum Tabanlı FET

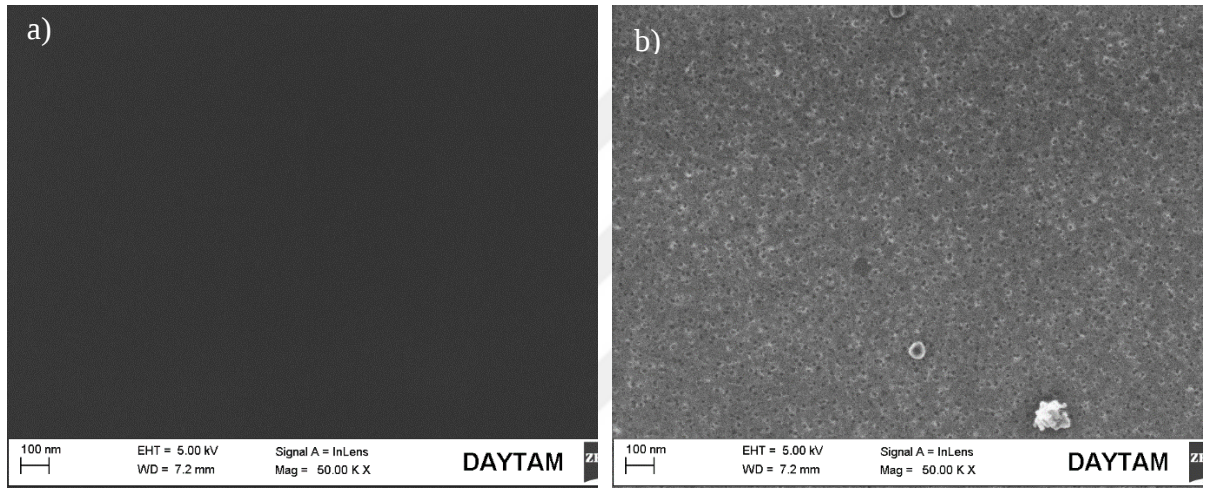
RFMS yöntemi gözenekli silisyum üzerine 5 s büyütülmüş WS_2 ince filmin SEM film karakterizasyonu yapılmıştır. Gözenekli silisyum üzerine büyütülen WS_2 film kullanılarak FET üretilmiş elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca WS_2 tabanlı FET ile aygıt performansları karşılaştırılmıştır.

WS_2 /Gözenekli silisyum malzeme karakterizasyonu

WS_2 filminin farklı alttaş yüzeyine kaplama çalışması kapsamında gözenekli silisyum yapısı oluşturulmuş ve Şekil 59'da gözenekli silisyumun üstten ve yandan SEM görüntüsü verilmiştir. Yaklaşık 500 nm kalınlığında gözenek yapısı oluşturulduğu şekilden görülmektedir. Si/ SiO_2 üzerine büyüyen filmin ve gözenekli silisyum üzerine büyüyen WS_2 filmin SEM görüntüleri Şekil 60'da verilmiştir. Şekilde silisyum üzerindeki gözenekli yapı ve WS_2 filminin sürekli olarak büyüdüğü görülmektedir.

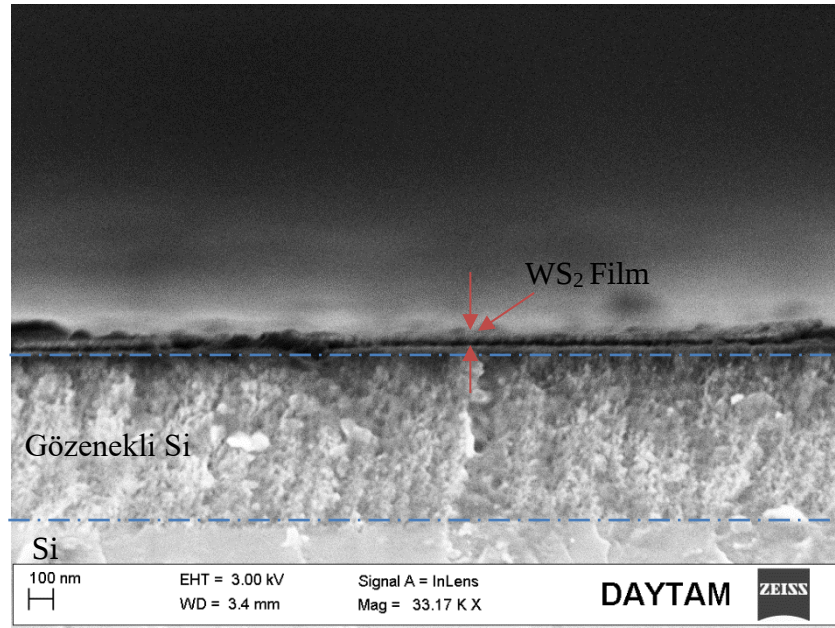


Şekil 59. Gözenekli Silisyum a) üstten b) yandan SEM görüntüsü



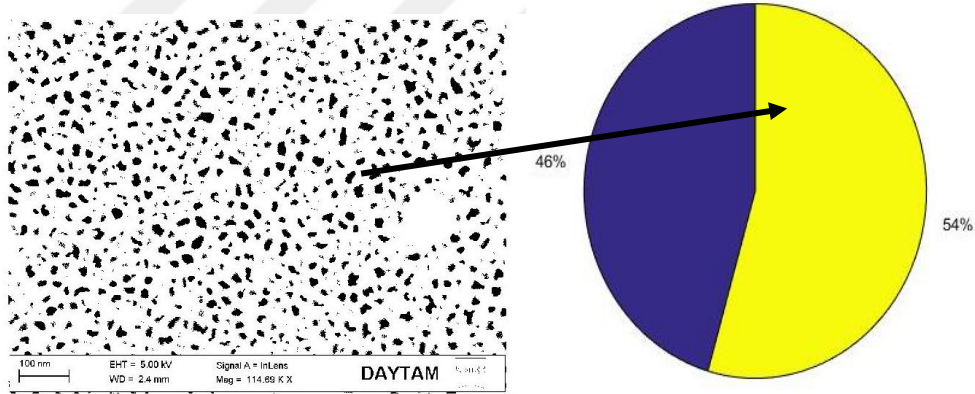
Şekil 60. a) Silisyum üzerine b) Gözenekli Silisyum üzerine 5 s büyüyen WS_2 film SEM görüntüsü

Gözenekli silisyum üzerine büyüyen WS_2 filmin yandan SEM görüntüsü Şekil 61’de verilmiştir. Film kalınlığının beklenen değer olan 5 nm’den büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun ölçüm almak için örnek kırılırken filmin kalkmış olmasından ve alttaş ile film arasındaki kalınlığından film kalınlığı gibi görüldüğü düşünülmektedir.



Şekil 61. Gözenekli Si/Si üzerine WS₂ filmin yandan SEM görüntüsü

Şekil 62’de görüldüğü üzere gözenekli silisyumun gözeneklilik oranı Gör (2018)’de bulunan matlab kodları kullanılarak % 54 olarak belirlenmiştir. Gözeneklilik oranı mobilite hesaplarken, dielektrik sabitini belirlemek için kullanılmıştır.



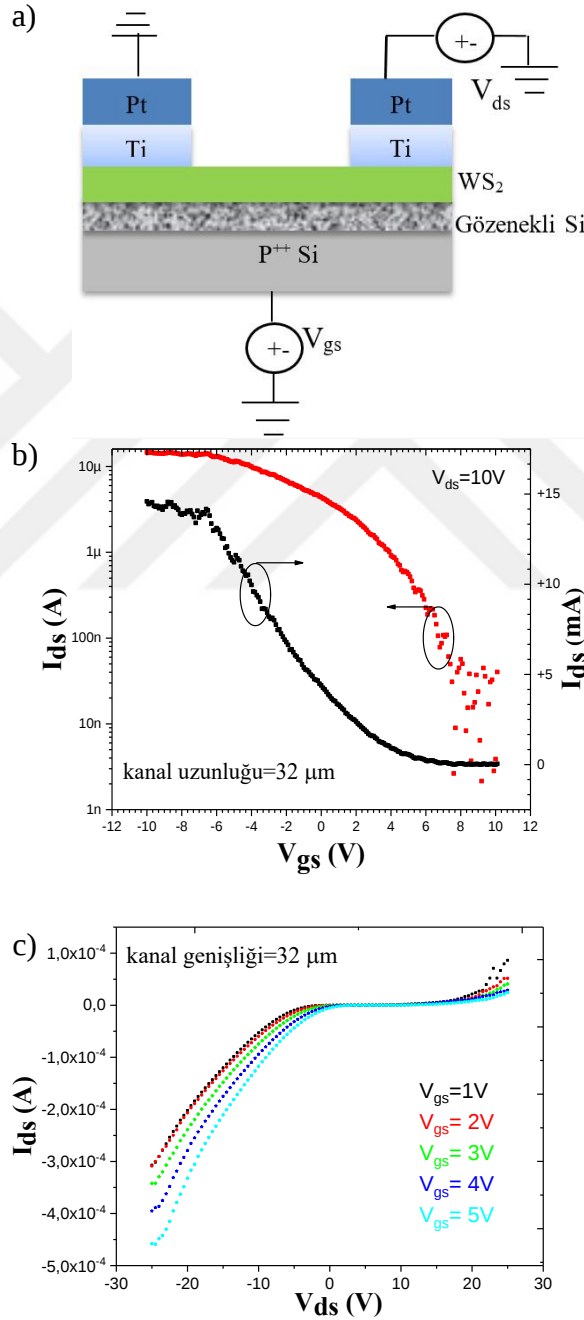
Şekil 62. Gözenekli silisyumun gözeneklilik oranı

WS₂/Gözenekli silisyum tabanlı FET elektriksel karakterizasyonu

Silisyum altaşın gözenekli yapı oluşturulduktan sonra gözenekli silisyumun yalıtkan özellik göstermesinden dolayı üzerine direkt olarak RFMS yöntemi ile 5 s WS₂ büyütülmesi ile oluşturulan FET yapısının oda sıcaklığında ve atmosfer şartlarında alınan ölçümleri aşağıda verilmiştir. Transfer ve çıkış öz eğrileri kullanılarak FET’e ait özellikler hesaplanmıştır. WS₂ tabanlı FET ile karşılaştırmıştır.

WS₂/Gözenekli Silisyum tabanlı FET şematik resmi Şekil 63a’da verilmiştir. Gözenekli Silisyum yalıtkan özellik gösterdiğinden diğer FET yapılarından farklı olarak oksit tabakası bulunmamaktadır. WS₂/Gözenekli Silisyum tabanlı FET geçiş eğrisi V_{ds} 10V’da sabit tutularak

ve V_{gs} gerilimi -12V ile 12V arasında taranarak elde edilmiş ve Şekil 63b’de verilmiştir. Şekilden FET’in p-tipi baskın ambipolar davranış gösterdiği ve açma/kapama oranının 10^3 - 10^4 arasında olduğu Si/SiO₂ tabanlı FET’e göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca gözenekli silisyum tabanlı FET’in çıkış eğrişi V_{ds} -30V ile 30V aralığında taranarak ve V_{gs} gerilimi 1 ile 5V arasından 1V’luk adımlarla değiştirilerek elde edilmiş ve Şekil 63c’de verilmiştir. Çıkış eğrisinden artan negatif voltaj ile akımın arttığı, FET’in deşikler için çalıştığı görülmektedir. Ayrıca elektronlar için akım V_{ds} gerilimi 20V’u geçtiğinde akımın aktığı görülmektedir.



Şekil 63. Ti/Pt kontaklara sahip gözenekli Si/WS₂ tabanlı FET’in a) şematik resmi b) transfer eğrisi c) çıkış eğrisi

SiO₂/Si tabanlı FET ile gözenekli silisyum tabanlı FET'in özelliklerinin karşılaştırmalı tablosu Tablo 7'de verilmiştir. Gözenekli silisyum tabanlı FET'in deşikler için mobilite değerinin 3,9 cm²/Vs olduğu ve SiO₂/Si tabanlı FET'ten 16 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Eşik değerin 3,3V olduğu ve SiO₂/Si tabanlı FET'ten daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Gözenekli Si ve Si-SiO₂ alttaş üzerine büyütülmüş WS₂ tabanlı FET'e ait aygıt özellikleri karşılaştırılması

FET	μ_p (cm ² /Vs)	gm_p	$V_{th,p}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$ Oranı
Gözenekli Si/ WS ₂	3,9	$1,4 \cdot 10^{-6}$	3,3	$\sim 10^3-10^4$
Si-SiO ₂ /WS ₂	0,23	$2,5 \cdot 10^{-8}$	14,9	$\sim 10^4-10^5$

MoS₂ İnce Film Tabanlı FET

MoS₂ ince filmi RFMS yöntemi ile farklı kalınlıklarda büyütülmüş ve optik mikroskop, SEM, RAMAN, RAMAN haritalama, XPS ve XRD kullanılarak film karakterizasyonu yapılmıştır. Büyütülen farklı kalınlıklardaki MoS₂ ince filmlerden FET üretilmiş ve aygıt karakterizasyonu yapılmıştır.

MoS₂ ince film karakterizasyonu

Optik mikroskop görüntüleri

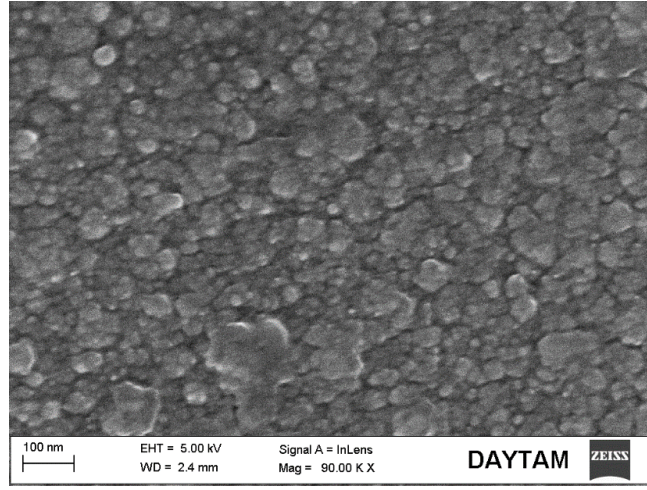
RFMS yöntemi ile 10 s büyütülen MoS₂ filminin optik mikroskop görüntüsü Şekil 64'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere MoS₂ filminin büyümediği Si/SiO₂ yüzey ve MoS₂ filminin olduğu alan, net olarak kontrast farkı vermektedir. Ayrıca şekilden MoS₂ filminin uniform ve sürekli olarak büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 64. 10 s büyütülmüş MoS₂ filmi ile Si/SiO₂ arayüzüne ait optik mikroskop görüntüsü

SEM ölçümleri

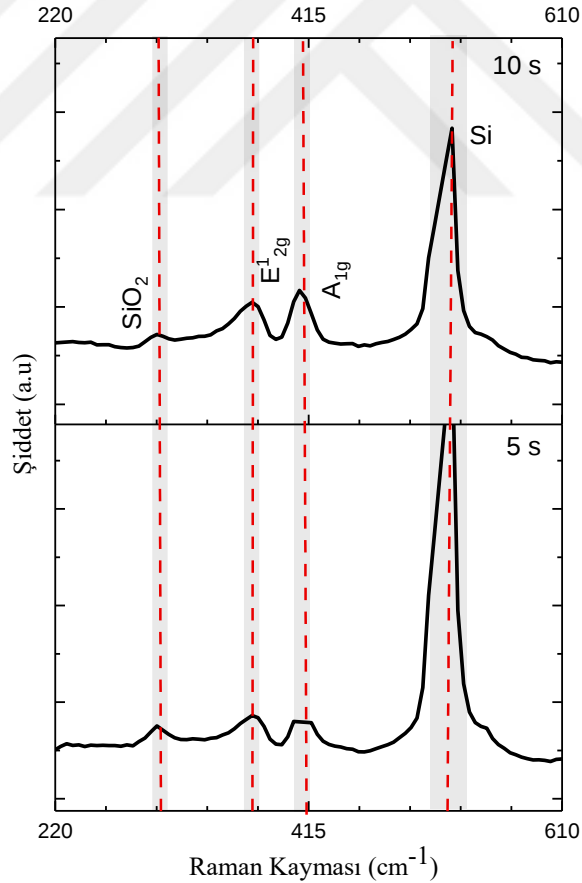
10 s büyütülmüş MoS₂ filmin SEM görüntüsü Şekil 65'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi MoS₂ filmi bütün alttaş üzerine homojen yani aynı şekilde büyümüştür. Büyütme süresi düşük tutulduğu için nano duvarlar bulunmamaktadır. Ayrıca WS₂ filme benzer büyüme göstermiştir.



Şekil 65. 10 s büyütülmüş MoS₂ film SEM görüntüsü

Raman ölçümleri

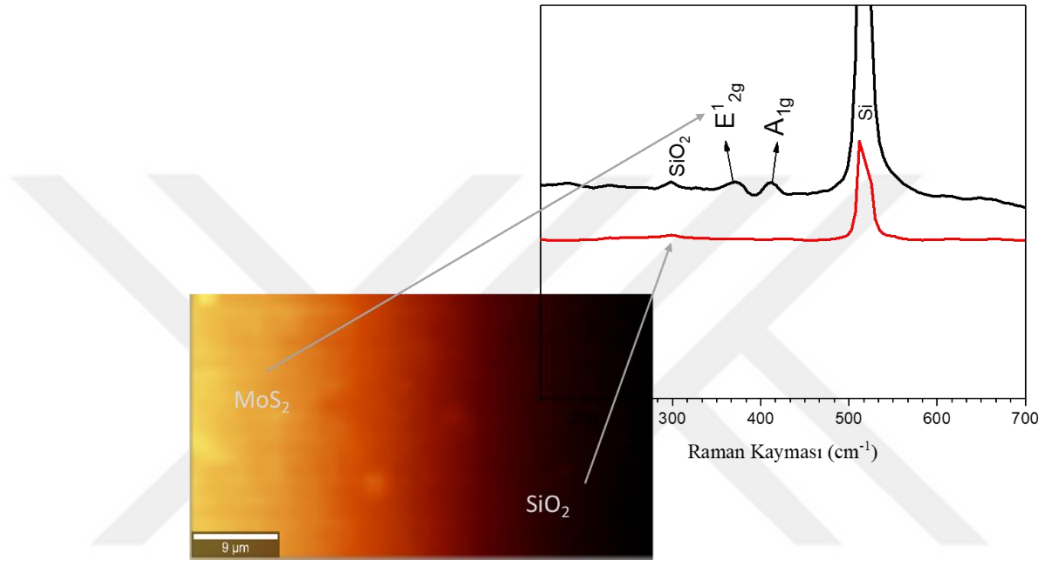
MoS₂ film RFMS yöntemi ile 5 s ve 10 s gibi farklı sürelerde Si/SiO₂ alttaş üzerine kaplanmış ve Raman ölçümleri alınmıştır. Şekil 66’da 5 ve 10 s büyütülmüş MoS₂ filmlerinin Raman spektrumları verilmiştir.



Şekil 66. Farklı sürelerde büyütülen MoS₂ filmlerinin Raman ölçümleri

Raman spekturumda literatürde de verildiği gibi (Singh *et al.* 2018) MoS₂ filminin varlığını kanıtlayan E_{12g} ve A_{1g} modları olmak üzere düşük şiddetli iki pik görülmektedir. Düzlem içi mod olan E_{12g} modu 380,6 cm⁻¹’de ve düzlem dışı mod olan A_{1g} modu

408,2 cm^{-1} 'de pik vermektedir ve 27,6 cm^{-1} frekans farkı bulunmaktadır ($\Delta w = A_{1g} - E_{2g}^1$). Düşük kristal kalitesi ve kusurların varlığının pik şiddetini etkilediği düşünülmektedir. Alttaştan gelen 520 cm^{-1} 'de Si'ye ait, 295,7 cm^{-1} 'de SiO_2 'ye ait şiddetli iki pik görülmektedir. MoS_2 film büyütme süresi arttıkça alttaştan gelen pik şiddeti azaldığı ve filminden gelen pik şiddetlerinin arttığı görülmektedir.. Literatürde tabaka sayısı arttıkça modlar arası frekans farkının da arttığı belirtilmektedir (Li and Zhu 2015), fakat bu çalışmada büyütme süreleri birbirine oldukça yakın olduğundan büyütme süresine bağlı modlar arasındaki frekans farkında belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

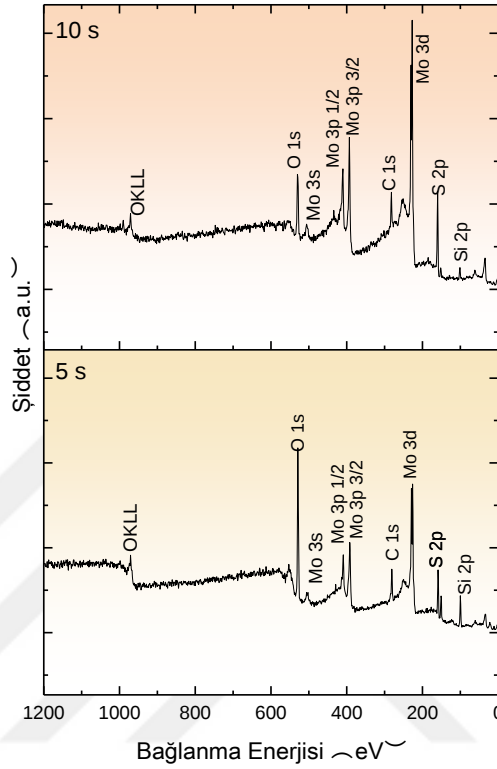


Şekil 67. 10 s büyütülmüş MoS_2 filmi için MoS_2 ince film ile Si/SiO₂ arayüzeyinde geniş alan Raman haritalama

RFMS yöntemi ile MoS_2 filmin sürekli olarak büyüdüğünü göstermek için Si/SiO₂ alttaş üzerine kalınlığa bağlı olarak büyütülen filmlerden 10 s büyütülmüş MoS_2 filmi ile film büyümeyen arayüzde geniş alanda ($5 \times 2,5 \text{ cm}^2$) Raman haritalama yapılmış ve Şekil 67'de verilmiştir. Şekil 67, SiO₂ alttaşı ve sürekli olarak büyüyen MoS_2 filmini göstermektedir. Alttaş (Si/SiO₂) ve MoS_2 filmi arasında görülen kontrast farkından da anlaşılacağı üzere alttaşın bir kısmı MoS_2 filmi ile kaplanmamıştır. Raman haritalamasından yüzeyde renk geçişi olduğu görülmektedir. Sarı bölge MoS_2 filmini gösterirken, siyaha doğru Si/SiO₂ alt tabakası görülmektedir. Şeklin iç kısmında her iki bölge için Raman spektrumları verilmiştir. Sarı bölgede SiO₂ piki ve Si piki ile birlikte MoS_2 pikleri görülürken, siyah bölgede sadece alttaştan gelen SiO₂ piki ve Si piki bulunmaktadır. MoS_2 'ye ait herhangi bir titreşim modu bulunmamaktadır.

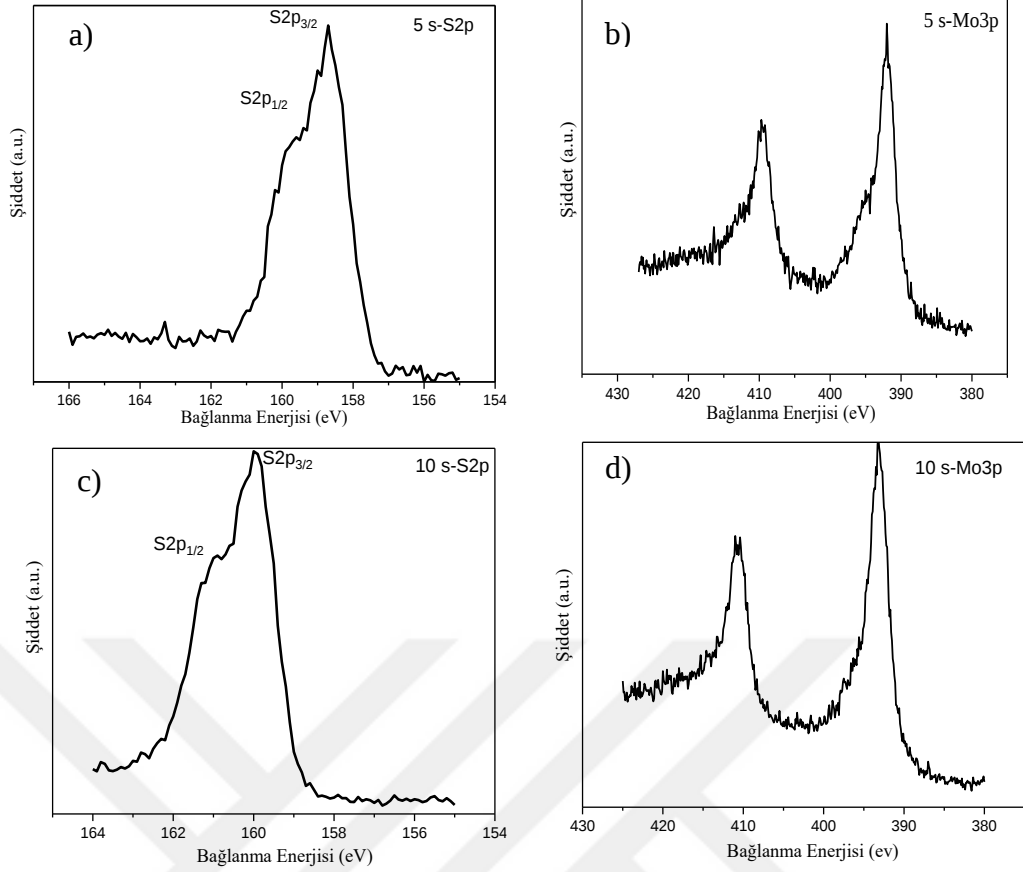
XPS ölçümleri

MoS₂ ince filmlerinin kimyasal birleşimini belirlemek için XPS ölçümleri alınmıştır. 5 ve 10 s büyütülmüş MoS₂ filmlerin XPS genel spektrumları Şekil 68’de verilmiştir. Grafik üzerindeki piklerin hangi elemente ait olduğu yazılmıştır.



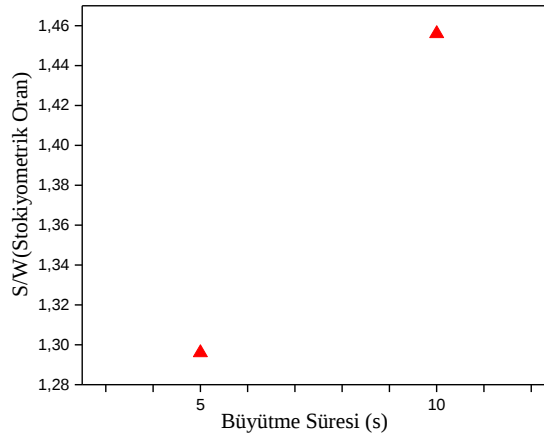
Şekil 68. Farklı sürelerde büyütülen MoS₂ filmlerinin genel XPS spektrumu

Mo ve S atomlarını kimyasal olarak bağ durumlarını anlayabilmek için XPS analizi yapılmıştır (Şekil 69). XPS spektrumunda Mo, S, O, C ve Si dışında başka bir element görülmemiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 5 s büyütülmüş örnek için sülfür atomları ile bağlantılı olan S_{2p_{1/2}} ve S_{2p_{3/2}}’ye karşılık gelen pikler sırasıyla 160 eV ve 159,6 eV’da gözlemlenmiştir. 5 s büyütülmüş film için Mo_{3p} piki 409,2 eV ve 392 eV’da gözlemlenmiştir. 10 s büyütülmüş örnek için sülfür atomları ile bağlantılı olan S_{2p_{1/2}} ve S_{2p_{3/2}}’ye karşılık gelen pikler sırasıyla 161,2 eV ve 160 eV’da gözlemlenmiştir. 10 s büyütülmüş film için Mo_{3p} piki 411 eV ve 393 eV’da gözlemlenmiştir. XPS spektrumları saçıtırma yöntemi ile büyütülmüş bir diğer çalışma ile benzerlik göstermektedir (Rigi *et al.* 2020).



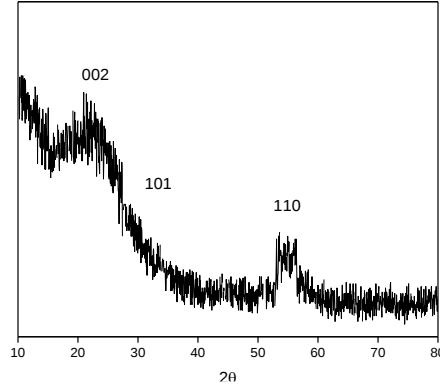
Şekil 69. Farklı sürelerde üretilen MoS₂ ince filmlerin büyütme süresine bağlı XPS analizleri a) 5 s büyütülmüş örnek S2p b) Mo3p c) 10 s büyütülmüş örnek için S2p d) Mo3p

Şekil 70’de 5 s ve 10 s sürelerde büyütülmüş MoS₂ ince filmleri için S/Mo stokiyometrik oranı verilmiştir ve bu oranın sırası ile 1,3 ile 1,45 olduğu görülmektedir. Film büyütme süresi arttıkça sülfür eksikliği azalmıştır.



Şekil 70. Sülfür atomunun molibden atomuna oranının büyütme süresi ile değişimi

XRD analizi



Şekil 71. 10 s büyütülmüş MoS₂ ince film için XRD ölçümü

MoS₂ filminin kristal yapı özelliklerini araştırmak amacıyla küçük geliş açısı yöntemi kullanılarak alttaş etkileri azaltılarak XRD ölçümleri gerçekleştirilmiş. Şekil 71’de bu ölçüm sonuçları verilmiştir. MoS₂ ince filmi için (002) $2\theta=21,8^\circ$ ’de ve (110) $2\theta=55,15^\circ$ ’de gözlenmiştir. (002)’deki güçlü pik daha önceki çalışmalardan da görülmüştür (Muratore *et al.* 2014).

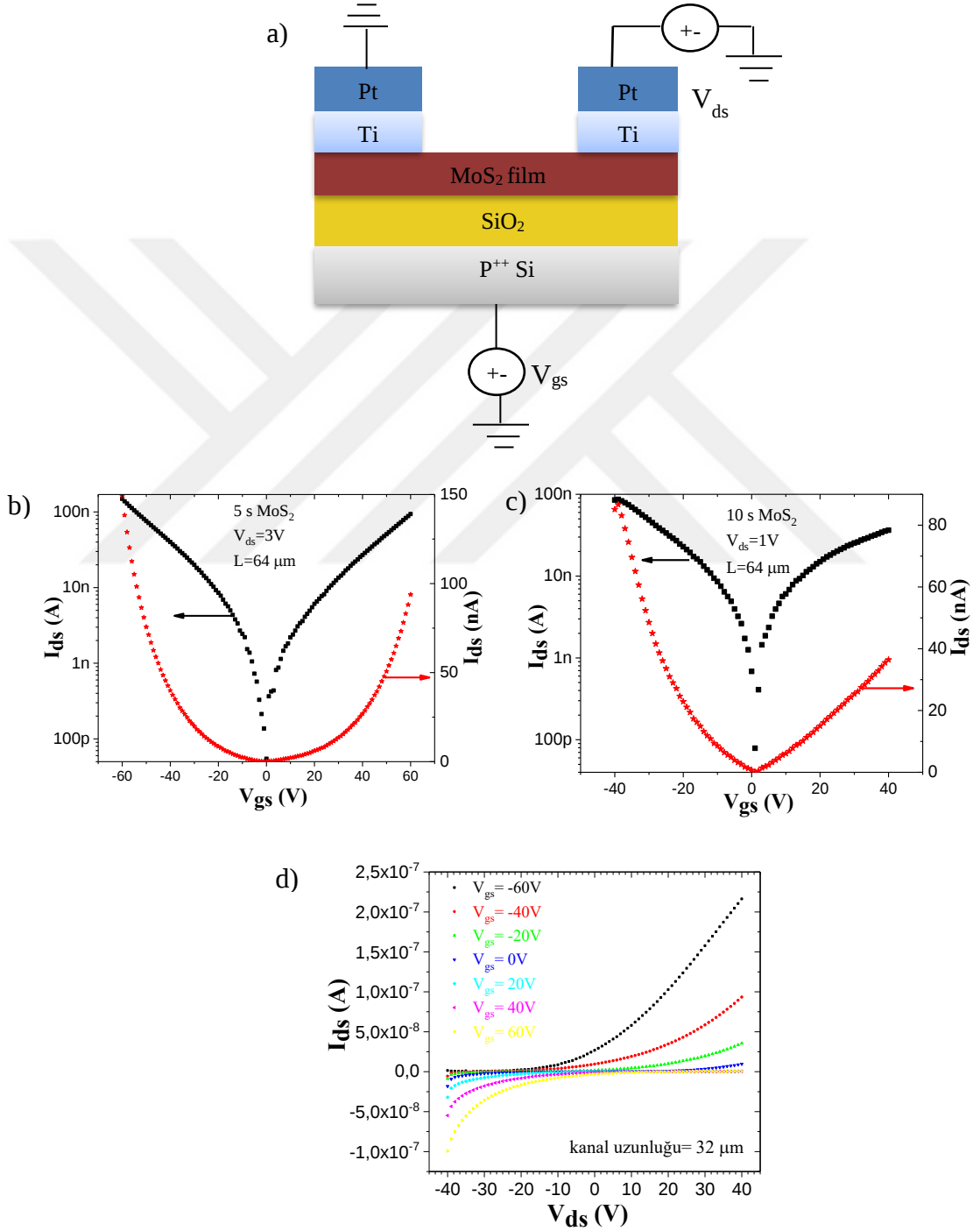
MoS₂ ince film tabanlı FET elektriksel karakterizasyonu

RFMS yöntemi ile farklı sürelerde büyütülmüş MoS₂ sürekli filmlerinin yarıiletken tabaka olarak kullanıldığı FET’lerin elektriksel karakterizasyonu yapılmış, transfer ve çıkış eğrileri verilmiştir. Transfer ve çıkış eğrileri kullanılarak FET’e ait özellikler hesaplanmıştır. Farklı kalınlıklarda büyütülen MoS₂ ince filmlerine göre FET özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca aygıt özellikleri aynı sürede büyütülen WS₂ tabanlı FET ile karşılaştırılmıştır.

MoS₂ tabanlı FET karakterizasyonu, MoS₂ yarıiletken film ve üzerinde bulunan akaç ve kaynak elektrotları (Ti/Pt) ile Al kaplı Si arka kapı olarak kullanılarak yapılmıştır. MoS₂ tabanlı FET’e ait şematik resim, transfer ve çıkış eğrileri Şekil 72’de verilmiştir. Şekil 72a’da görüldüğü gibi Al arka kontağa sahip arka kapılı FET’in omik kontak olabilmesi için Ti/Pt (5 nm/50 nm) kullanılarak akaç ve kaynak elektrotlar oluşturulmuştur. 5 ve 10 s büyütülmüş MoS₂ yarıiletkeni kullanılarak üretilmiş FET’in transfer eğrileri logaritmik ve lineer ekseninde verilmiştir (Şekil 72b-c). 5 s büyütülmüş film için V_{ds} gerilimi 3 V’da, 10 s büyütülmüş film için V_{ds} gerilimi 1V’da sabit tutularak, V_{gs} voltajı değiştirilerek I-V ölçümü alınmıştır. Her iki FET için kanal uzunluğu 64 μm , kanal genişliği 150 μm ’dir. Her iki FET’inde ambipolar davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca WS₂ tabanlı FET’de olduğu gibi yüksek V_{ds} voltajlarında yapılan ölçümlerde unipolar davranış gözlenmiştir. 10 s büyütülmüş MoS₂ tabanlı FET’in daha çok p-tipi baskın ambipolar davranış gösterdiği görülmektedir. Transfer karakteristiğinden açma/kapama oranının nispeten WS₂ tabanlı FET’e göre daha düşük ve

yaklaşık $\sim 10^3$ - 10^4 olduğu görülmektedir. Çıkış karakteristiği $-40V$ ile $40V$ arasında V_{ds} taranarak elde edilmiştir. V_{gs} gerilimi ise $-60V$ ile $60V$ arasında $20V$ adımlarla uygulanmıştır (Şekil 72d).

Çıkış karakteristiğinden de açıkça görüldüğü üzere arka kapıya uygulanan V_{gs} gerilimi ile I_{ds} akımı kontrol edilebilmektedir. Ayrıca Ti/Pt kontaktların düşük bariyer yüksekliğine sahip Schottky davranış sergiledikleri görülmektedir.



Şekil 72. Ti/Pt kontaktlara sahip MoS₂ tabanlı FET'in şematik resmi b) 5 s c) 10 s büyütülmüş MoS₂ tabanlı FET'in logaritmik ve lineer eksen için transfer eğrisi d) 5 s büyütülmüş MoS₂ tabanlı FET'in çıkış eğrisi

5 s ve 10 s büyütülmüş MoS₂ sürekli film tabanlı FET için elektron ve deşik için mobilite değeri (μ), eşik değeri (V_{th}) değeri, iletkenlik (g_m) ve açma/kapama oranı hesaplanmış ve Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 8’e baktığımızda p tipi mobilite değerlerinin 5 s büyütülmüş MoS₂ için 0,07 cm²/Vs ve 10 s büyütülmüş MoS₂ için 0,16 cm²/Vs olduğu ve film kalınlığı arttıkça mobilite değerinin arttığı görülmektedir. Mobilitedeki kalınlığa bağlı artışın, artan kalınlıkla MoS₂ bant aralığındaki daralma ve ek iletim kanallarının kontaklardaki Schottky bariyer yüksekliğini düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Das *et al.* 2013; Liu *et al.* 2013).

Tablo 8. MoS₂ tabanlı FET’e ait aygıt özellikleri

Süre (s)	Özellik						
	μ_p (cm ² /Vs)	$g_{m,p}$	$V_{th,p}$ (V)	μ_n (cm ² /Vs)	$g_{m,n}$	$V_{th,n}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$ Oranı
5	0,07	6,15*10 ⁻⁹	-37	0,04	3,45*10 ⁻⁹	32	~10 ³ -10 ⁴
10	0,16	3,79*10 ⁻⁹	-16	0,03	1,03*10 ⁻⁹	5,5	~10 ³ -10 ⁴

Benzer mobilite değerleri n-tipi içinde olduğu görülmektedir. 10 s MoS₂ tabanlı FET’in daha çok p-tipi baskın ambipolar davranış gösterdiği tablodaki mobilite değerlerinden de görülmektedir. Eşik gerilim değeri p-tipi için sırasıyla 5 s ve 10 s film için -37 V ve -16 V olarak çıkarılmıştır. V_{th} değerinin artan kalınlıkla azaldığı p- ve n-tipi için görülmektedir. 10 s büyütülmüş MoS₂ ve WS₂ tabanlı FET özellikleri karşılaştırılmıştır ve aygıt özellikleri Tablo 9’da verilmiştir. WS₂ tabanlı FET’in mobilite ve açma/kapama oranı bakımından daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 9. 10 s büyütülmüş WS₂ ve MoS₂ tabanlı FET’e ait karşılaştırmalı aygıt özellikleri

FET	μ_p (cm ² /Vs)	$g_{m,p}$	$V_{th,p}$ (V)	μ_n (cm ² /Vs)	$g_{m,n}$	$V_{th,n}$ (V)	$I_{açma}/I_{kapama}$ Oranı
WS ₂	17,6	1,9*10 ⁻⁶	12	5,3	4*10 ⁻⁷	-3,9	~10 ⁴ -10 ⁵
MoS ₂	0,16	3,79*10 ⁻⁹	-16	0,03	1,04*10 ⁻⁹	5,5	~10 ³ -10 ⁴

Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında üretilen MoS₂ tabanlı FET’in performansını literatürle karşılaştırmak amacıyla Tablo 10’da farklı yöntemlerle büyütülmüş MoS₂ FET performansları verilmiştir. FET’lerin 0,005-17 cm²/Vs arası mobilite gösterdiği ve $I_{açma}/I_{kapama}$ oranının minimum 10² maksimum 10⁸ olduğu tablodan görülmektedir. Bazı CVD ve ayrılma yöntemi ile elde edilmiş yüksek kaliteli filmlerle üretilen FET’lerle, CVD ve ayrılma yöntemi kullanılan çalışmalarda daha iyi aygıt performansları görülmektedir. Fakat saçtırtma yöntemi kullanılan çalışmalarla karşılaştırılabilir FET performansı bu çalışmada elde edilmiştir. Özellikle bu tez çalışmasında kullanılan saçtırtma yöntemi kullanılarak yapılan çalışmaları incelediğimizde tek-adımda MoS₂ hedef kullanılarak herhangi bir son adım kullanmadan bu tez çalışmasındaki değerler olan 0.16 cm²/Vs mobilite ve 10⁴ $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı elde edebilen çalışma olmadığı görülmektedir. Ayrıca bu çalışmaya en yakın çalışma olan MoS₂’nin saçtırtma yöntemi ile büyütülüp daha sonra sülfürlendiği çalışmada bile 0,0136 cm²/Vs mobilite

değeri ve 10^4 $I_{açma}/I_{kapama}$ oranı elde edilmiştir (Huang *et al.* 2016). Bu nedenle MoS₂ filminin RFMS yöntemi ile tek adımda büyütülmesi ile elde edilen bu FET fabrikasyonu literatüre bir yenilik katmaktadır.

Tablo 10. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MoS₂ film tabanlı FET karşılaştırma tablosu

Yöntem	Alan etkili mobilité (cm ² /Vs)	$I_{açma}/I_{kapama}$ oranı	Referans
tek-adım MoS₂ saçırtma	0,04-0,16	$\sim 10^3$-10^4	bu çalışma
CVD	0,02	$\sim 10^4$	(Lee <i>et al.</i> 2012)
APCVD	1,2	10^7	(Lee <i>et al.</i> 2013)
CVD	0,003-0,03	$\sim 10^3$	(Yu <i>et al.</i> 2013)
CVD	4,3	6×10^6	(Najmaei <i>et al.</i> 2013)
CVD	0,03-0,23	$\sim 10^5$	(Zhang <i>et al.</i> 2013)
CVD	17	10^8	(Wu <i>et al.</i> 2013)
e-beam-CVD	0,004-0,04		(Zhan <i>et al.</i> 2012)
ayırılma (exfoliated)	1,5	$\sim 10^2$	(Lin <i>et al.</i> 2012)
ayırılma (exfoliated)	3	-	(Novoselov <i>et al.</i> 2005)
ayırılma (exfoliated)	0,1-10	1×10^6	(Radisavljevic <i>et al.</i> 2011)
ayırılma (exfoliated)	10-15	10^7	(Wang <i>et al.</i> 2012)
saçırtma-sülfürleme	0,8	10^5	(Lin <i>et al.</i> 2012)
saçırtma-sülfürleme	0,005-0,01	-	(Orofeo <i>et al.</i> 2014)
MoS ₂ saçırtma-sülfürleme	0,0136-0,0564	10^4	(Huang <i>et al.</i> 2016)
Mo saçırtma-CVD	12,24	$1,56 \times 10^6$	(Choudhary <i>et al.</i> 2014)
Mo ion beam saçırtma-sülfürleme	0,9 (hole mobilitesi)	$\sim 10^3$	(Wei <i>et al.</i> 2019)

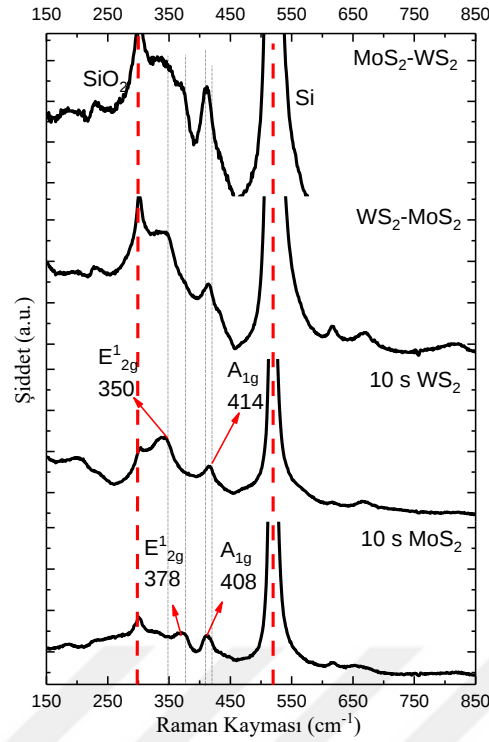
MoS₂/WS₂ Heteroeklem FET

RFMS yöntemi ile 10 s MoS₂ ince filmi üzerine yine aynı yöntemle alttaş saçırtma cihazından çıkarılmadan 10 s WS₂ ince filmi kaplanarak heteroeklem oluşturulmuştur. Heteroeklemin Raman kullanılarak karakterizasyonu yapılmıştır. Büyütülen MoS₂/WS₂ heteroeklem ile standart yöntemle FET üretilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Heteroeklem FET'in WS₂ ve MoS₂ tabanlı FET ile aygıt performansları karşılaştırılmıştır.

MoS₂/WS₂ heteroeklem malzeme karakterizasyonu

Raman ölçümleri

WS₂ ve MoS₂ sürekli filmlerinden heteroeklem oluşturma çalışması kapsamında 10 s büyütülmüş MoS₂, 10 s büyütülmüş WS₂ ve MoS₂/WS₂ heterofilminin Raman ölçümleri alınmış, Şekil 73'te verilmiştir.



Şekil 73. 10 s MoS₂/10 s WS₂ heteroyapısının Raman 10 s MoS₂ ve 10 s WS₂ karşılaştırmalı Raman ölçümleri

Raman ölçümleri incelendiğinde yaklaşık olarak MoS₂ (378, 408 cm⁻¹) ve WS₂ (350, 414 cm⁻¹) pikler vermiştir. Heteroeklemin A_{1g} modunda WS₂ ve MoS₂'den gelen pikler birbirine çok yakın olduğundan net olarak ayrı ayrı belli olmamaktadır. Ayrıca alttaştan gelen Si ve SiO₂ pikleri de görülmektedir. Literatürde verilen MoS₂/WS₂ heteroeklem Raman ölçümleri ile uyum sağladığı görülmektedir (Zhang *et al.* 2016).

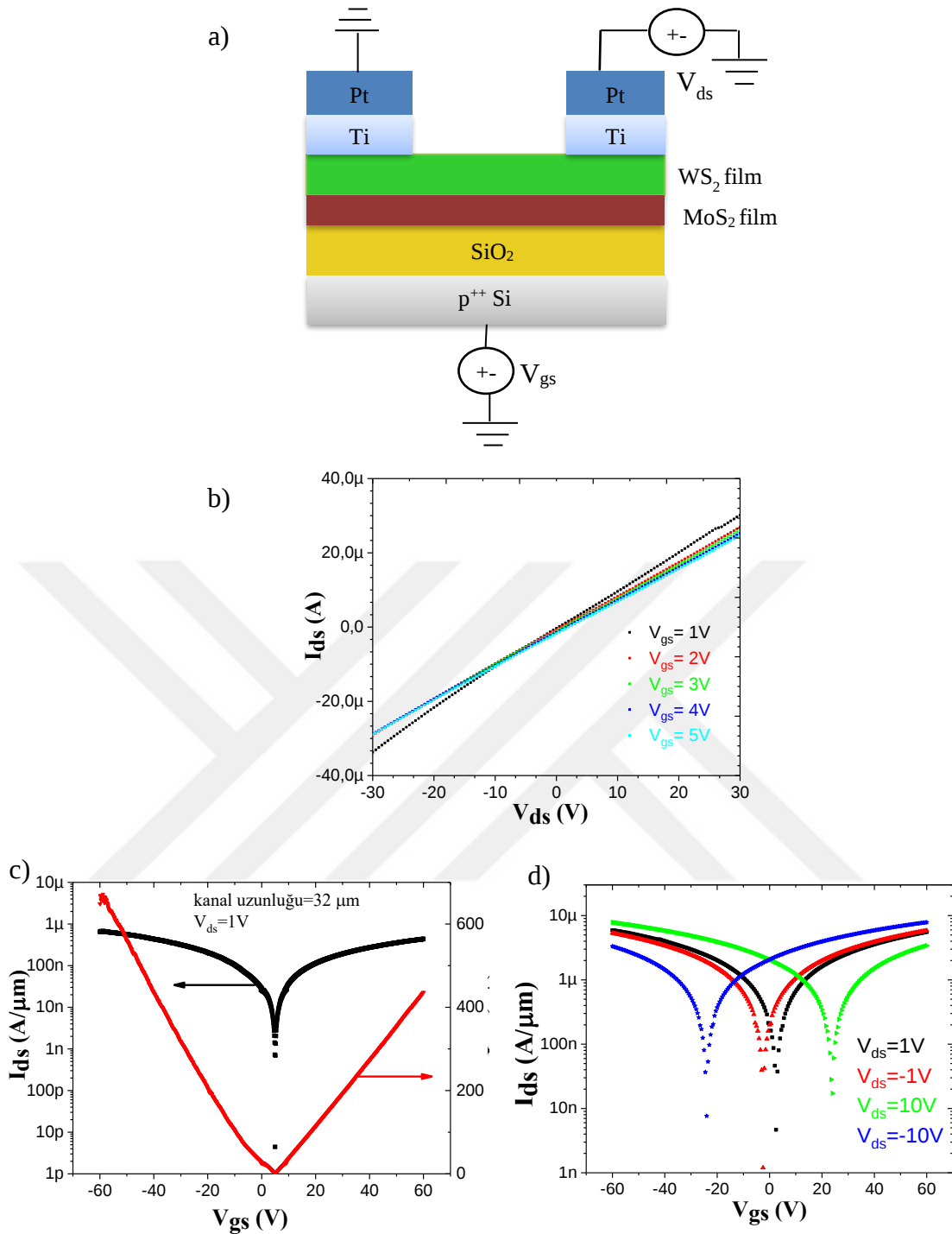
MoS₂/WS₂ heteroeklem FET elektriksel karakterizasyonu

RFMS yöntemi ile ilk olarak 10 s MoS₂ sürekli filmi üzerine 10 s WS₂ sürekli filminin büyütülmesi ile oluşturulmuş heteroeklem üzerine FET üretilmiştir. Bu heteroyapının yarıiletken tabaka olarak kullanıldığı FET'lerin elektriksel karakterizasyonu yapılmış, transfer ve çıkış eğrileri verilmiştir.

MoS₂/WS₂ heteroyapı tabanlı FET karakterizasyonu, MoS₂/WS₂ yarıiletken film üzerinde bulunan akaç ve kaynak elektrotları (Ti/Pt) ile Al kaplı Si arka kapı olarak kullanılarak yapılmıştır. MoS₂/WS₂ Heteroeklem FET'e ait şematik resim, transfer ve çıkış eğrileri Şekil 74'te verilmiştir. Şekil 74a'da görüldüğü gibi Al arka kontağa sahip arka kapılı FET omik kontak olabilmesi için Ti/Pt (5 nm/50 nm) kullanılarak akaç ve kaynak elektrotlar oluşturulmuştur. Çıkış karakteristiği -30V ile 30V arasında V_{ds} 1V ile 5V arası 1V'luk adımlarla taranarak elde edilmiştir. V_{gs} gerilimi ise -1V ile 5V arasında 1V adımlarla uygulanmıştır (Şekil 74b). Çıkış karakteristiğinden de açıkça görüldüğü üzere arka kapıya uygulanan V_{gs} gerilimi ile

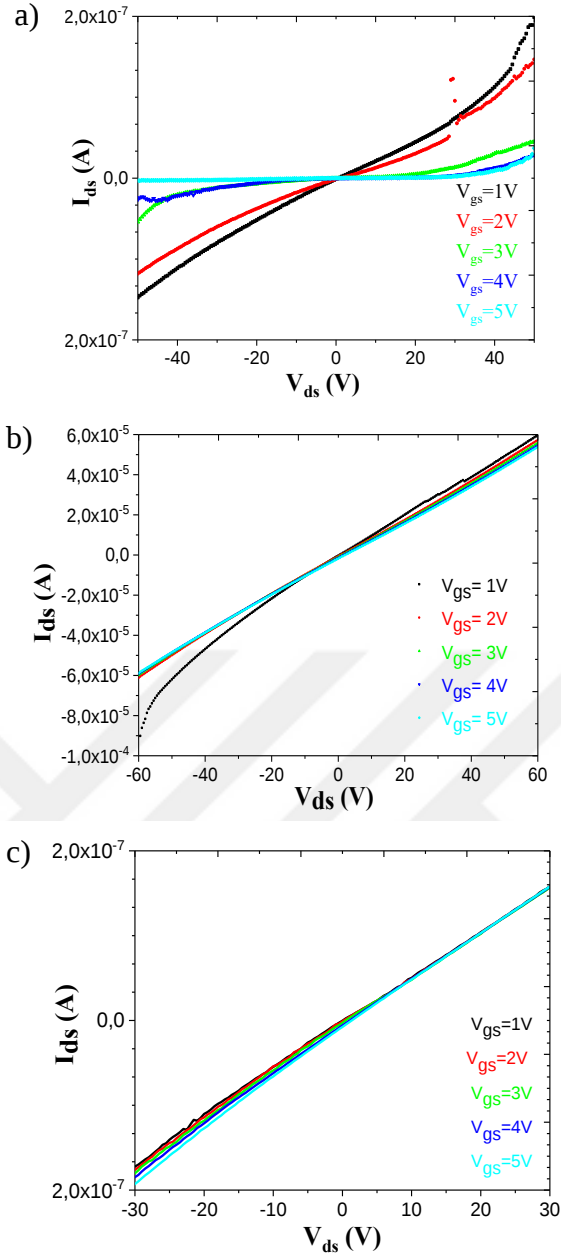
I_{ds} akımı kontrol edilebilmektedir. Ayrıca küçük voltajlarda omik kontak olduğu çıkış eğrisinden görülmektedir. 10 s MoS₂/10 s WS₂ heteroyapısı kullanılarak üretilmiş FET'in transfer eğrisi logaritmik eksenle verilmiştir (Şekil 74c). Transistörün kanal genişliği 32 μm , kanal uzunluğu 150 μm 'dir. V_{ds} gerilimi 1 V'da sabit tutularak V_{gs} eksenine -60V ile 60V arasında taramıştır. Transfer karakteristiğinden açma/kapama oranı yaklaşık 10^5 - 10^6 ve deşik mobilitesi 7,2 cm^2/Vs olarak hesaplanmıştır. Düşük V_{ds} voltajında transistörün ambipolar davranış sergilediği görülmüştür. MoS₂/WS₂ heteroyapı temelli FET için çizilen farklı V_{ds} voltajları için akım grafiğinden açıkça görüldüğü üzere FET'in polaritesi V_{ds} gerilimi ile değiştirilebilmektedir (Şekil 74d). V_{ds} 10V'da iken p-tipi baskın karakter gösterirken -10V'da n-tipi baskın olmaktadır. Bu durumda FET'in V_{ds} voltajı ile polaritesinin modüle edilebildiğini göstermektedir.





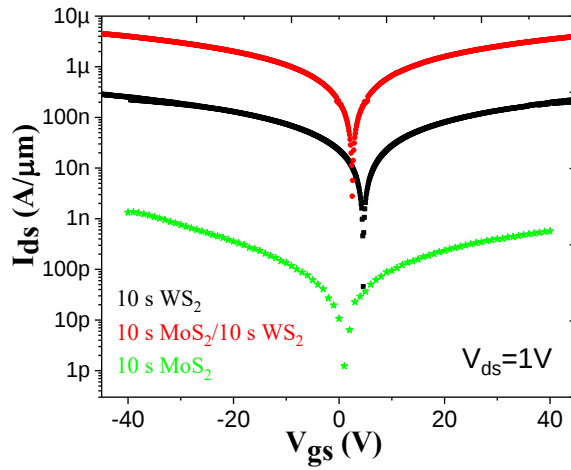
Şekil 74. RFMS yöntemi ile üst üste büyütülmüş 10 s MoS₂/10 s WS₂ tabanlı FET'in a) şematik resmi b) transfer eğrisi b) çıkış eğrisi d) farklı V_{ds} değerleri için transfer eğrisi

Çıkış karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla WS₂, MoS₂ ve MoS₂/WS₂ heteroeklem tabanlı her bir FET'e ait çıkış eğrileri Şekil 75'de verilmiştir. MoS₂ tabanlı FET ile MoS₂/WS₂ heteroyapı temelli FET'lerin çıkış karakteristiklerinin benzer olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeninin kontaktlar altında kalan 2B yarıiletken MoS₂ malzemesinin aynı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla aynı alttaş üzerine ve aynı şartlarda büyütülmüş MoS₂/WS₂ heteroyapı tabanlı, WS₂ tabanlı ve MoS₂ tabanlı FET'e ait özellikler Tablo 11'de verilmiştir.



Şekil 75. a) WS₂ tabanlı b) MOS₂/WS₂ heteroeklem tabanlı c) MoS₂ tabanlı FET çıkış eğrileri

Şekil 76'daki transfer eğrilerinden MOS₂/WS₂ tabanlı FET'in en yüksek MoS₂ tabanlı FET'in en düşük açma-kapama akımları gösterdiği görülmektedir. Düşük V_{ds} voltajlarında ölçüm alındığı için her üç FET'de ambipolar davranış göstermiştir. Tablo 11'de görüldüğü üzere heteroeklem tabanlı FET, diğer aygıtlara göre daha yüksek mobilite ve açma/kapama oranı göstermiştir.



Şekil 76. WS₂ tabanlı, MOS₂/WS₂ heteroeklem tabanlı ve MoS₂ tabanlı FET transfer eğrileri

Tablo 11. WS₂, MOS₂/WS₂ Ve MoS₂ tabanlı FET özellikleri karşılaştırma tablosu

FET	μ_p (cm ² /Vs)	$V_{th,p}$ (V)	$g_{m,p}$	μ_n (cm ² /Vs)	$V_{th,n}$ (V)	$g_{m,n}$	$I_{Açma}/I_{Kapama}$ oranı
MoS ₂ /WS ₂	7,2	-4,6	$3,96 \cdot 10^{-7}$	4,7	6	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$\sim 10^5$ - 10^6
WS ₂	0,014	-3	$1,13 \cdot 10^{-8}$	0,013	5,7	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$\sim 10^4$ - 10^5
MoS ₂	0,009	-7,5	$4,85 \cdot 10^{-10}$	0,011	4,1	$6,07 \cdot 10^{-10}$	$\sim 10^3$ - 10^4

Literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmak amacıyla Tablo 12’de farklı yöntemlerle üretilmiş MoS₂/WS₂ heteroeklem tabanlı FET’lere ait performans özellikleri verilmiştir. Literatürde yer alan MoS₂/WS₂ tabanlı FET’ler incelendiğinde CVD ve ayrılma yöntemi ile yapılmış dikey ve yanal heteroyapıların çalışıldığı 2 çalışma bulunmaktadır. Saçtırtma yöntemi ile tek adımda saçtırtma cihazından çıkarmadan heteroyapıyı oluşturan çalışma bilginiz dâhilinde bulunmamaktadır, literatüre yenilik olarak bu tez çalışmasında sunulmuştur. Üretilen FET’in 7,2 cm²/Vs deşik mobilitesi değeri ve 10⁵ açma/kapama oranı ile yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırdınca kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir. Ek olarak, 2B TMDC tabanlı dikey heteroyapılar TMDC malzemelerin örgü uyumsuzluğu probleminden etkilenmediğinden yüksek kaliteli arayüzlere sahip olabilmektedirler (Su *et al.* 2014; Zhang *et al.* 2019).

Tablo 12. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MoS₂/WS₂ heteroyapı tabanlı FET karşılaştırma tablosu

Yöntem	Alan etkili mobilite (cm ² /Vs)	$I_{Açma}/I_{Kapama}$ oranı	Referans
saçtırtma	7,2 (deşik)	10⁵	bu çalışma
Ayrılma (dikey)	14	$>10^4$	(Huo <i>et al.</i> 2014)
Ayrılma (yatay)	65	10^5	(Huo <i>et al.</i> 2014)
Ayrılma	0,51	-	(Gong <i>et al.</i> 2014)
CVD	15-34	$>10^6$	Gong <i>et al.</i> 2014)

Genel olarak FET performansları incelendiğinde ölçümler vakum altında alınsaydı ve kontak direnci azaltılabilseydi mobilite ve akım açma/kapama oranında iyileşme olacağı düşünülmektedir (Jariwala *et al.* 2013).

Ayrıca üretilen FET’lerde ambipolar davranış gözlenmiştir. Transistörlerdeki ambipolar davranışın sebebi literatürde çeşitli nedenlere dayandırılmaktadır. Bunlar,

1. Yarıiletken kanalın kalınlığı değiştirilerek polaritenin değiştirilebileceği (Pudasaini *et al.* 2018; Wang *et al.* 2018)
2. Tungsten oksit oluşması p-tipi katkılama etkisi yapmaktadır ve bu da ambipolar özellik göstermeye sebep olmaktadır. Bu çalışmada da kullanılan argon gazının oksijen içermesinden dolayı oksitli yapıların oluştuğu ve ambipolariteye sebep olduğu düşünülmektedir.
3. Çalışmadaki ambipolaritenin sebeplerinden biri olduğu düşünülen, yarıiletken tabakada bulunan kusurlar ve boşluklar gibi yük tuzakları (Ren *et al.* 2019)
4. Bu çalışma kapsamında büyütülen filmlerde sitokiyometrik olarak 1:2 oranı gözlenmediği araştırma bulguları ve tartışmada verilmiştir. Literatürde sülfür oranının ambipolariteye sebep olduğu bildirilmektedir. Sülfür oranı 2’ye doğru yaklaştıkça n-tipi özellik gösteren WS₂ ve MoS₂, sülfür oranı 2’den 1’e doğru uzaklaştıkça p-tipi davranış göstermektedir.
5. Malzemede bulunan sülfür boşluklarından dolayı filmlerin yüzeyinde oluşan oksit tabakası ile tungsten bağ oluşturabilmektedir. Bu durum da gözlenen ambipolaritenin diğer bir sebebi olabileceği düşünülmektedir.
6. Yüzeyde biriken su buharından dolayı filmin hemen yüzeyinde artı yüklerden (H⁺) bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabaka ince film içindeki serbest elektronların bir kısmının tuzaklanmasına sebep olur. Bu durumun bu çalışmadaki ambipolaritenin diğer bir sebebi olabileceği düşünülmektedir. Aygıtların yüksek voltajlarda unipolar davranış göstermesi bunun bir kanıtı olabilir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında TMDC malzemelerin aygıt uygulamalarının ticarileştirilmesi için yüzeylere geniş alan, sürekli film ve homojen olarak büyütülmesine çözüm olarak RFMS yönteminin kullanılması önerilmiştir. TMDC malzemelerden olan WS₂ ve MoS₂ RFMS yöntemi farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. Ayrıca MoS₂ ve WS₂ üst üste büyütülerek MoS₂/WS₂ heteroyapısı da oluşturulmuştur. Büyütülen bu filmlerin karakterizasyonu yapılmıştır. Büyütülen filmlerden FET ve p-n eklem üretilmiştir. Üretilen aygıtların elektriksel ölçümleri alınıp, karakterizasyonu yapılmış ve sonuçlar araştırma bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir. Üretilen FET'lerin akaç-kaynak voltajı ile polaritesinin değiştirilebildiği görülmüştür. FET'ler düşük voltajlarda ambipolar davranış sergilerken, yüksek voltajlarda unipolar davranış gözlemlenmiştir.

- Farklı kalınlıklarda büyütülen WS₂ filmleri kullanılarak üretilen WS₂ tabanlı FET'ler 0,002-301 cm²/Vs arası mobilite ve yaklaşık 10⁴-10⁵ arası akım açma/kapama oranı göstermişlerdir. Mobilite değerinin artan kalınlıkla arttığı gözlenmiştir. Ayrıca farklı kanal uzunluklarında alınan ölçümlerde kanal uzunluğunun mobilite ve akım açma/kapama oranı üzerinde büyük etkisi gözlenmemiştir. Fakat düşük kanal uzunluklarında açma ve kapama akım seviyelerinin arttığı gözlenmiştir.
- Farklı kalınlıklarda büyütülen MoS₂ filmleri kullanılarak üretilen MoS₂ tabanlı FET'ler 0,07-0,16 cm²/Vs arası mobilite ve yaklaşık 10³-10⁴ akım açma/kapama oranı göstermişlerdir. Mobilite değerinin artan kalınlıkla arttığı gözlenmiştir. Aynı sürede büyütülmüş WS₂ ve MoS₂ tabanlı FET'lerin aygıt performansları karşılaştırıldığında WS₂ tabanlı FET'in yaklaşık 110 kat daha yüksek mobilite ve bir mertebe daha yüksek açma/kapama oranı göstermişlerdir.
- Altaş olarak silisyum yerine gözenekli silisyumun kullanıldığı çalışmada gözenekli silisyum üzerine TMDC malzemelerin örgü uyumsuzluğu olmadan büyütülebildiği ve üretilen FET'in 3,9 cm²/Vs mobilite ve 10³-10⁴ akım açma/kapama oranı gösterdiği gözlenmiştir. SiO₂/Si tabanlı FET'den mobilite değerinin 16 kat daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Vakum odasından hiç çıkarılmadan MoS₂/WS₂ heteroyapısı elde edilmiş ve FET üretilmiştir. Üretilen FET 7,2 cm²/Vs (deşik), 4,7 cm²/Vs (elektron) mobilitesi gösterdiği ve 10⁵-10⁶ arası akım açma/kapama oranı göstermiştir. WS₂ ve MoS₂ tabanlı FET'ler ile karşılaştırıldığında hem mobilite hem akım açma/kapama oranının iyileştiği gözlenmiştir.

Öneriler

- Aygıt performanslarının iyileştirilmesi için 2B malzemelerde düşük kontak dirençlerinin elde edilmesi önem arz etmektedir. Kontak dirençlerini azaltmak için farklı iş fonksiyonlarına sahip metaller ile Schottky bariyerinin düşürülmesi planlanmaktadır. Ayrıca metalik fazda 2B malzeme kullanılarak kontak direncinin düşürüldüğü literatürden bilinmektedir. Kontak alanları 1T fazında 2B metaller (WO_3 , MoO_3) kaplanarak kontak direncinin düşürülmesi planlanmaktadır.
- Aygıt yapısı aygıt performansı üstünde büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada üretiminin basit olmasından dolayı arka kapı konfigürasyonuna sahip aygıt yapısı tercih edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda üst kapı aygıt yapısı kullanılarak FET'lerin üretilmesi ve üst kapı için farklı yüksek-k kapı oksitleri (h-bN , HfO_2 vd.) kullanılması planlanmaktadır.
- 2B malzemelerin büyüme mekanizmalarını anlamak ve aygıtın çalışması hakkında bilgi edinmek için hesaplamalı simülasyonlar yapılması düşünülmektedir. Bu teorik çalışmalar neticesinde malzeme kalitesini ve aygıt performansını iyileştirmenin mümkün olabileceği düşünülmektedir.
- P- veya n-tipi olarak çalıştırılabilen ambipolar transistörlerin azaltılmış daha az cihaz bileşeni içermesi ve üretim sürecinin kolaylığı nedeniyle CMOS invertörleri ve dolayısıyla mantık devrelerinde kullanılması planlanmaktadır.
- Ambipolar transistörlerin, ek kapı ve tünelleme katmanı eklenerek flaş belleğine dönüştürülebilmesi mümkün olduğundan TMDC malzemeler ile flaş belleği uygulaması yapılması düşünülmektedir.
- Öğrenme işlevini simüle etmek için kapı terminalinin, sinyal iletimini simüle etmek için akaç-kaynak kanalının kullanılmasıyla ambipolar transistörlerin sinaptik uygulamaların yapay modellenmesi için de kullanılması mümkündür.
- Gözenekli silisyum ve TMDC tabanlı FET'lerin performanslarının gözenek çapı, gözenekli bölgenin derinliği ve gözenek yoğunluğuna göre çalışılması düşünülmektedir. Ayrıca gözenekli silisyumun artan yüzey alanı ile sensör uygulamalarında avantaja sahip olduğu bilinmektedir. WS_2 ve MoS_2 FET'lerden sensör uygulaması yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abbas, A.N., Liu, B., Chen, L., Ma, Y., Cong, S., Aroonyadet, N., Köpf, M., Nilges, T. and Zhou, C., 2015. Black phosphorus gas sensors. *Acs Nano*, 9(5), 5618-5624.
- Aftab, S., Khan, M.F., Min, K.-A., Nazir, G., Afzal, A.M., Dastgeer, G., Akhtar, I., Seo, Y., Hong, S. and Eom, J., 2017. Van der waals heterojunction diode composed of ws2 flake placed on p-type si substrate. *Nanotechnology*, 29(4), 045201.
- Ahn, C., Lee, J., Kim, H.U., Bark, H., Jeon, M., Ryu, G.H., Lee, Z., Yeom, G.Y., Kim, K. and Jung, J., 2015. Low-temperature synthesis of large-scale molybdenum disulfide thin films directly on a plastic substrate using plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Advanced Materials*, 27(35), 5223-5229.
- Akinwande, D., Petrone, N. and Hone, J., 2014. Two-dimensional flexible nanoelectronics. *Nature Communications*, 5, 5678.
- Al-Hardan, N.H., Abdul Hamid, M.A., Ahmed, N.M., Jalar, A., Shamsudin, R., Othman, N.K., Kar Keng, L., Chiu, W. and Al-Rawi, H.N., 2016. High sensitivity ph sensor based on porous silicon (psi) extended gate field-effect transistor. *Sensors*, 16(6), 839.
- Ayari, A., Cobas, E., Ogundadegbe, O. and Fuhrer, M.S., 2007. Realization and electrical characterization of ultrathin crystals of layered transition-metal dichalcogenides. *Journal of Applied Physics*, 101(1), 014507.
- Badawy, W.A., 2008. Effect of porous silicon layer on the performance of si/oxide photovoltaic and photoelectrochemical cells. *Journal of alloys and compounds*, 464(1-2), 347-351.
- Balandin, A.A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. and Lau, C.N., 2008. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902-907.
- Bao, W.Z., Cai, X.H., Kim, D., Sridhara, K. and Fuhrer, M.S., 2013. High mobility ambipolar mos2 field-effect transistors: Substrate and dielectric effects. *Applied Physics Letters*, 102(4).
- Baughner, B.W., Churchill, H.O., Yang, Y. and Jarillo-Herrero, P., 2014. Optoelectronic devices based on electrically tunable p-n diodes in a monolayer dichalcogenide. *Nature nanotechnology*, 9(4), 262-267.
- Bertolazzi, S., Krasnozhon, D. and Kis, A., 2013. Nonvolatile memory cells based on mos2/graphene heterostructures. *Acs Nano*, 7(4), 3246-3252.
- Bisri, S.Z., Piliago, C., Gao, J. and Loi, M.A., 2014. Outlook and emerging semiconducting materials for ambipolar transistors. *Advanced Materials*, 26(8), 1176-1199.
- Bourenane, K., Keffous, A. and Nezzal, G., 2007. Electrical properties of schottky diode pt/sic and pt/porous sic performed on highly resistif p-type 6h-sic. *Vacuum*, 81(5), 663-668.
- Braga, D., Lezama, I.G., Berger, H. and Morpurgo, A.F., 2012. Quantitative determination of the band gap of ws2 with ambipolar ionic liquid-gated transistors. *Nano Letters*, 12(10), 5218-5223.
- Britnell, L., Gorbachev, R.V., Jalil, R., Belle, B.D., Schedin, F., Mishchenko, A., Georgiou, T., Katsnelson, M.I., Eaves, L., Morozov, S.V., Peres, N.M.R., Leist, J., Geim, A.K., Novoselov, K.S. and Ponomarenko, L.A., 2012. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures. *Science*, 335(6071), 947-950.
- Butler, S.Z., Hollen, S.M., Cao, L., Cui, Y., Gupta, J.A., Gutiérrez, H.R., Heinz, T.F., Hong, S.S., Huang, J. and Ismach, A.F., 2013. Progress, challenges, and opportunities in two-dimensional materials beyond graphene. *Acs Nano*, 7(4), 2898-2926.
- Castellanos-Gomez, A., Barkelid, M., Goossens, A., Calado, V.E., van der Zant, H.S. and Steele, G.A., 2012. Laser-thinning of mos2: On demand generation of a single-layer semiconductor. *Nano Letters*, 12(6), 3187-3192.

- Chang, H.-Y., Zhu, W. and Akinwande, D., 2014. On the mobility and contact resistance evaluation for transistors based on mos2 or two-dimensional semiconducting atomic crystals. *Applied Physics Letters*, 104(11), 113504.
- Chen, W., Zhao, J., Zhang, J., Gu, L., Yang, Z., Li, X., Yu, H., Zhu, X., Yang, R. and Shi, D., 2015. Oxygen-assisted chemical vapor deposition growth of large single-crystal and high-quality monolayer mos2. *Journal of the American Chemical Society*, 137(50), 15632-15635.
- Chen, Z., Lee, T.Y. and Bosman, G., 1994. Electrical band gap of porous silicon. *Applied Physics Letters*, 64(25), 3446-3448.
- Chhowalla, M., Jena, D. and Zhang, H., 2016. Two-dimensional semiconductors for transistors. *Nature Reviews Materials*, 1(11), 1-15.
- Chhowalla, M., Shin, H.S., Eda, G., Li, L.-J., Loh, K.P. and Zhang, H., 2013. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature chemistry*, 5(4), 263.
- Chiu, M.-H., 2018. Band alignment determination of two-dimensional heterojunctions and their electronic applications.
- Choi, W., Choudhary, N., Han, G.H., Park, J., Akinwande, D. and Lee, Y.H., 2017. Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications. *Materials Today*, 20(3), 116-130.
- Choudhary, N., Park, J., Hwang, J.Y. and Choi, W., 2014. Growth of large-scale and thickness-modulated mos2 nanosheets. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 6(23), 21215-21222.
- Chuang, H.J., Tan, X.B., Ghimire, N.J., Perera, M.M., Chamlagain, B., Cheng, M.M.C., Yan, J.Q., Mandrus, D., Tomanek, D. and Zhou, Z.X., 2014. High mobility wse2 p- and n-type field-effect transistors contacted by highly doped graphene for low-resistance contacts. *Nano Letters*, 14(6), 3594-3601.
- Chuang, S., Battaglia, C., Azcatl, A., McDonnell, S., Kang, J.S., Yin, X., Tosun, M., Kapadia, R., Fang, H. and Wallace, R.M., 2014. Mos2 p-type transistors and diodes enabled by high work function moo x contacts. *Nano Letters*, 14(3), 1337-1342.
- Ciarrocchi, A., Avsar, A., Ovchinnikov, D. and Kis, A., 2018. Thickness-modulated metal-to-semiconductor transformation in a transition metal dichalcogenide. *Nature Communications*, 9(1), 1-6.
- Coleman, J.N., Lotya, M., O'Neill, A., Bergin, S.D., King, P.J., Khan, U., Young, K., Gaucher, A., De, S. and Smith, R.J., 2011. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 331(6017), 568-571.
- Cui, Y., Xin, R., Yu, Z., Pan, Y., Ong, Z.Y., Wei, X., Wang, J., Nan, H., Ni, Z. and Wu, Y., 2015. High-performance monolayer ws2 field-effect transistors on high- κ dielectrics. *Advanced Materials*, 27(35), 5230-5234.
- Das, S. and Appenzeller, J., 2013. Wse2 field effect transistors with enhanced ambipolar characteristics. *Applied Physics Letters*, 103(10).
- Das, S., Chen, H.-Y., Penumatcha, A.V. and Appenzeller, J., 2013. High performance multilayer mos2 transistors with scandium contacts. *Nano Letters*, 13(1), 100-105.
- Dean, C.R., Young, A.F., Meric, I., Lee, C., Wang, L., Sorgenfrei, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kim, P. and Shepard, K.L., 2010. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nature nanotechnology*, 5(10), 722.
- Dhanekar, S. and Jain, S., 2013. Porous silicon biosensor: Current status. *Biosensors and bioelectronics*, 41, 54-64.
- Dhyani, V., Dwivedi, P., Dhanekar, S. and Das, S., 2017. High performance broadband photodetector based on mos2/porous silicon heterojunction. *Applied Physics Letters*, 111(19), 191107.
- Dimitrov, D., 1995. Current-voltage characteristics of porous-silicon layers. *Physical Review B*, 51(3), 1562.

- Du, Y., Yang, L., Liu, H. and Ye, P.D., 2014. Contact research strategy for emerging molybdenum disulfide and other two-dimensional field-effect transistors. *APL Materials*, 2(9), 1031.
- Duan, X.D., Wang, C., Shaw, J.C., Cheng, R., Chen, Y., Li, H.L., Wu, X.P., Tang, Y., Zhang, Q.L., Pan, A.L., Jiang, J.H., Yu, R.Q., Huang, Y. and Duan, X.F., 2014. Lateral epitaxial growth of two-dimensional layered semiconductor heterojunctions. *Nature nanotechnology*, 9(12), 1024-1030.
- Dwivedi, P., Das, S. and Dhanekar, S., 2017. Wafer-scale synthesized mos2/porous silicon nanostructures for efficient and selective ethanol sensing at room temperature. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(24), 21017-21024.
- Edgar, L.J., 1930. Method and apparatus for controlling electric currents. Google Patents.
- Eichfeld, S.M., Hossain, L., Lin, Y.-C., Piasecki, A.F., Kupp, B., Birdwell, A.G., Burke, R.A., Lu, N., Peng, X. and Li, J., 2015. Highly scalable, atomically thin wse2 grown via metal-organic chemical vapor deposition. *Acs Nano*, 9(2), 2080-2087.
- English, C.D., Shine, G., Dorgan, V.E., Saraswat, K.C. and Pop, E., 2016. Improved contacts to mos2 transistors by ultra-high vacuum metal deposition. *Nano Letters*, 16(6), 3824-3830.
- Esmaili-Rad, M.R. and Salahuddin, S., 2013. High performance molybdenum disulfide amorphous silicon heterojunction photodetector. *Scientific reports*, 3.
- Fang, H., Chuang, S., Chang, T.C., Takei, K., Takahashi, T. and Javey, A., 2012. High-performance single layered wse2 p-fets with chemically doped contacts. *Nano Letters*, 12(7), 3788-3792.
- Fang, H., Tosun, M., Seol, G., Chang, T.C., Takei, K., Guo, J. and Javey, A., 2013. Degenerate n-doping of few-layer transition metal dichalcogenides by potassium. *Nano Letters*, 13(5), 1991-1995.
- Fei, L., Lei, S., Zhang, W.-B., Lu, W., Lin, Z., Lam, C.H., Chai, Y. and Wang, Y., 2016. Direct tem observations of growth mechanisms of two-dimensional mos 2 flakes. *Nature Communications*, 7(1), 1-7.
- Fiori, G., Bonaccorso, F., Iannaccone, G., Palacios, T., Neumaier, D., Seabaugh, A., Banerjee, S.K. and Colombo, L., 2014. Electronics based on two-dimensional materials. *Nature nanotechnology*, 9(10), 768.
- Fivaz, R. and Mooser, E., 1967. Mobility of charge carriers in semiconducting layer structures. *Physical Review*, 163(3), 743.
- Fleischauer, P.D. and Lince, J.R., 1999. A comparison of oxidation and oxygen substitution in mos2 solid film lubricants. *Tribology international*, 32(11), 627-636.
- Föll, H., Christophersen, M., Carstensen, J. and Hasse, G., 2002. Formation and application of porous silicon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 39(4), 93-141.
- Furchi, M.M., Pospischil, A., Libisch, F., Burgdorfer, J. and Mueller, T., 2014. Photovoltaic effect in an electrically tunable van der waals heterojunction. *Nano Letters*, 14(8), 4785-4791.
- Gao, L., 2017. Flexible device applications of 2d semiconductors. *small*, 13(35), 1603994.
- Gao, Y., Liu, Z., Sun, D.-M., Huang, L., Ma, L.-P., Yin, L.-C., Ma, T., Zhang, Z., Ma, X.-L. and Peng, L.-M., 2015. Large-area synthesis of high-quality and uniform monolayer ws 2 on reusable au foils. *Nature Communications*, 6, 8569.
- Geim, A.K. and Grigorieva, I.V., 2013. Van der waals heterostructures. *Nature*, 499(7459), 419-425.
- Geim, A.K. and Novoselov, K.S., 2010. The rise of graphene. *Nanoscience and technology: A collection of reviews from nature journals*. World Scientific: pp: 11-19.
- Georgiou, T., Jalil, R., Belle, B.D., Britnell, L., Gorbachev, R.V., Morozov, S.V., Kim, Y.J., Gholinia, A., Haigh, S.J., Makarovskiy, O., Eaves, L., Ponomarenko, L.A., Geim, A.K., Novoselov, K.S. and Mishchenko, A., 2013. Vertical field-effect transistor based on

- graphene-ws₂ heterostructures for flexible and transparent electronics. *Nature nanotechnology*, 8(2), 100-103.
- Gong, C., Hu, K., Wang, X., Wangyang, P., Yan, C., Chu, J., Liao, M., Dai, L., Zhai, T. and Wang, C., 2018. 2d nanomaterial arrays for electronics and optoelectronics. *Advanced Functional Materials*, 28(16), 1706559.
- Gong, Y., Lin, J., Wang, X., Shi, G., Lei, S., Lin, Z., Zou, X., Ye, G., Vajtai, R. and Yakobson, B.I., 2014. Vertical and in-plane heterostructures from ws₂/mos₂ monolayers. *Nature materials*, 13(12), 1135-1142.
- Gong, Y., Ye, G., Lei, S., Shi, G., He, Y., Lin, J., Zhang, X., Vajtai, R., Pantelides, S.T. and Zhou, W., 2016. Synthesis of millimeter-scale transition metal dichalcogenides single crystals. *Advanced Functional Materials*, 26(12), 2009-2015.
- Guimarães, M.H., Gao, H., Han, Y., Kang, K., Xie, S., Kim, C.-J., Muller, D.A., Ralph, D.C. and Park, J., 2016. Atomically thin ohmic edge contacts between two-dimensional materials. *Acs Nano*, 10(6), 6392-6399.
- Guo, Y. and Robertson, J., 2016. Band engineering in transition metal dichalcogenides: Stacked versus lateral heterostructures. *Applied Physics Letters*, 108(23), 233104.
- Gülnahar, M., Karacali, T. and Efeoglu, H., 2015. Porous si based al schottky structures on p+-si: A possible way for nano schottky fabrication. *Electrochimica Acta*, 168, 41-49.
- Gör, M., 2018. Gözenekli Silisyum Tabanlı Yakıt Pili Membranı Üretimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hao, L., Liu, Y., Gao, W., Han, Z., Xue, Q., Zeng, H., Wu, Z., Zhu, J. and Zhang, W., 2015. Electrical and photovoltaic characteristics of mos₂/si pn junctions. *Journal of Applied Physics*, 117(11), 114502.
- Hao, L., Liu, Y., Han, Z., Xu, Z. and Zhu, J., 2017. Large lateral photovoltaic effect in mos₂/gaas heterojunction. *Nanoscale research letters*, 12(1), 562.
- Huang, C., Wu, S., Sanchez, A.M., Peters, J.J., Beanland, R., Ross, J.S., Rivera, P., Yao, W., Cobden, D.H. and Xu, X., 2014. Lateral heterojunctions within monolayer mose₂-wse₂ semiconductors. *Nature materials*, 13(12), 1096-1101.
- Huang, J.H., Chen, H.H., Liu, P.S., Lu, L.S., Wu, C.T., Chou, C.T., Lee, Y.J., Li, L.J., Chang, W.H. and Hou, T.H., 2016. Large-area few-layer mos₂ deposited by sputtering. *Materials Research Express*, 3(6).
- Huang, J.K., Pu, J., Hsu, C.L., Chiu, M.H., Juang, Z.Y., Chang, Y.H., Chang, W.H., Iwasa, Y., Takenobu, T. and Li, L.J., 2014. Large-area synthesis of highly crystalline wse₂ mono layers and device applications. *Acs Nano*, 8(1), 923-930.
- Huang, X., Zeng, Z. and Zhang, H., 2013. Metal dichalcogenide nanosheets: Preparation, properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 42(5), 1934-1946.
- Huo, N., Kang, J., Wei, Z., Li, S.S., Li, J. and Wei, S.H., 2014. Novel and enhanced optoelectronic performances of multilayer mos₂-ws₂ heterostructure transistors. *Advanced Functional Materials*, 24(44), 7025-7031.
- Huo, N. and Konstantatos, G., 2018. Recent progress and future prospects of 2d-based photodetectors. *Advanced Materials*, 30(51), 1801164.
- Hussain, S., Khan, M.F., Shehzad, M.A., Vikraman, D., Iqbal, M.Z., Choi, D.C., Song, W., An, K.S., Seo, Y., Eom, J., Lee, W.G. and Jung, J., 2016. Layer-modulated, wafer scale and continuous ultra-thin ws₂ films grown by rf sputtering via post-deposition annealing. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(33), 7846-7852.
- Hussain, S., Singh, J., Vikraman, D., Singh, A.K., Iqbal, M.Z., Khan, M.F., Kumar, P., Choi, D.-C., Song, W. and An, K.-S., 2016. Large-area, continuous and high electrical performances of bilayer to few layers mos₂ fabricated by rf sputtering via post-deposition annealing method. *Scientific reports*, 6(1), 1-13.
- Hwang, H., Khim, D., Yun, J.M., Jung, E., Jang, S.Y., Jang, Y.H., Noh, Y.Y. and Kim, D.Y., 2015. Quinoidal molecules as a new class of ambipolar semiconductor originating from amphoteric redox behavior. *Advanced Functional Materials*, 25(7), 1146-1156.

- Hwang, W.S., Remskar, M., Yan, R.S., Protasenko, V., Tahy, K., Chae, S.D., Zhao, P., Konar, A., Xing, H.L., Seabaugh, A. and Jena, D., 2012. Transistors with chemically synthesized layered semiconductor ws2 exhibiting 10(5) room temperature modulation and ambipolar behavior. *Applied Physics Letters*, 101(1).
- Jariwala, D., Sangwan, V.K., Late, D.J., Johns, J.E., Dravid, V.P., Marks, T.J., Lauhon, L.J. and Hersam, M.C., 2013. Band-like transport in high mobility unencapsulated single-layer mos2 transistors. *Applied Physics Letters*, 102(17), 173107.
- Jariwala, D., Sangwan, V.K., Lauhon, L.J., Marks, T.J. and Hersam, M.C., 2014. Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Acs Nano*, 8(2), 1102-1120.
- Jawaid, A., Nepal, D., Park, K., Jespersen, M., Qualley, A., Mirau, P., Drummy, L.F. and Vaia, R.A., 2016. Mechanism for liquid phase exfoliation of mos2. *Chemistry of Materials*, 28(1), 337-348.
- Jia, Z., Dong, J., Liu, L., Xiang, J., Nie, A., Wen, F., Mu, C., Wang, B., Zhai, K. and Yu, Z., 2019. One-step growth of wafer-scale monolayer tungsten disulfide via hydrogen sulfide assisted chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 115(16), 163104.
- Jo, S., Ubrig, N., Berger, H., Kuzmenko, A.B. and Morpurgo, A.F., 2014. Mono- and bilayer ws2 light-emitting transistors. *Nano Letters*, 14(4), 2019-2025.
- Juvalid, M. and Rao, M.R., 2020. Wafer scale growth of mos2 and ws2 by pulsed laser deposition. *Materials Today: Proceedings*.
- Kahng, D., 1960. Silicon-silicon dioxide field induced surface devices. In *the Solid State Device Research Conf.*, Pittsburgh, PA.
- Kang, K., Xie, S., Huang, L., Han, Y., Huang, P.Y., Mak, K.F., Kim, C.-J., Muller, D. and Park, J., 2015. High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity. *Nature*, 520(7549), 656.
- Kang, K., Xie, S., Huang, L., Han, Y., Huang, P.Y., Mak, K.F., Kim, C.-J., Muller, D. and Park, J., 2015. High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity. *Nature*, 520(7549), 656-660.
- Kappera, R., Voiry, D., Yalcin, S.E., Branch, B., Gupta, G., Mohite, A.D. and Chhowalla, M., 2014. Phase-engineered low-resistance contacts for ultrathin mos 2 transistors. *Nature materials*, 13(12), 1128.
- Kappera, R., Voiry, D., Yalcin, S.E., Jen, W., Acerce, M., Torrel, S., Branch, B., Lei, S., Chen, W. and Najmaei, S., 2014. Metallic 1t phase source/drain electrodes for field effect transistors from chemical vapor deposited mos2. *APL Materials*, 2(9), 092516.
- Kastl, C., Koch, R.J., Chen, C.T., Eichhorn, J., Ulstrup, S., Bostwick, A., Jozwiak, C., Kuykendall, T.R., Borys, N.J. and Toma, F.M., 2019. Effects of defects on band structure and excitons in ws2 revealed by nanoscale photoemission spectroscopy. *Acs Nano*, 13(2), 1284-1291.
- Kim, S., Konar, A., Hwang, W.-S., Lee, J.H., Lee, J., Yang, J., Jung, C., Kim, H., Yoo, J.-B. and Choi, J.-Y., 2012. High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer mos 2 crystals. *Nature Communications*, 3, 1011.
- Kolobov, A.V. and Tominaga, J., 2016. Raman scattering of 2d tmdcs. *Two-dimensional transition-metal dichalcogenides*. Springer: pp: 227-294.
- Kuc, A., Zibouche, N. and Heine, T., 2011. Influence of quantum confinement on the electronic structure of the transition metal sulfide t s 2. *Physical Review B*, 83(24), 245213.
- Laskar, M.R., Ma, L., Kannappan, S., Sung Park, P., Krishnamoorthy, S., Nath, D.N., Lu, W., Wu, Y. and Rajan, S., 2013. Large area single crystal (0001) oriented mos2. *Applied Physics Letters*, 102(25), 252108.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W. and Hone, J., 2008. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321(5887), 385-388.

- Lee, E.W., Lee, C.H., Paul, P.K., Ma, L., McCulloch, W.D., Krishnamoorthy, S., Wu, Y., Arehart, A.R. and Rajan, S., 2015. Layer-transferred mos2/gan pn diodes. *Applied Physics Letters*, 107(10), 103505.
- Lee, E.W., Ma, L., Nath, D.N., Lee, C.H., Arehart, A., Wu, Y. and Rajan, S., 2014. Growth and electrical characterization of two-dimensional layered mos2/sic heterojunctions. *Applied Physics Letters*, 105(20), 203504.
- Lee, G.-H., Cui, X., Kim, Y.D., Arefe, G., Zhang, X., Lee, C.-H., Ye, F., Watanabe, K., Taniguchi, T. and Kim, P., 2015. Highly stable, dual-gated mos2 transistors encapsulated by hexagonal boron nitride with gate-controllable contact, resistance, and threshold voltage. *Acs Nano*, 9(7), 7019-7026.
- Lee, I., Rathi, S., Lim, D., Li, L., Park, J., Lee, Y., Yi, K.S., Dhakal, K.P., Kim, J., Lee, C., Lee, G.H., Kim, Y.D., Hone, J., Yun, S.J., Youn, D.H. and Kim, G.H., 2016. Gate-tunable hole and electron carrier transport in atomically thin dual-channel wse2/mos2 heterostructure for ambipolar field-effect transistors. *Advanced Materials*, 28(43), 9519-9525.
- Lee, Y.-H., Yu, L., Wang, H., Fang, W., Ling, X., Shi, Y., Lin, C.-T., Huang, J.-K., Chang, M.-T. and Chang, C.-S., 2013. Synthesis and transfer of single-layer transition metal disulfides on diverse surfaces. *Nano Letters*, 13(4), 1852-1857.
- Lee, Y., Lee, J., Bark, H., Oh, I.-K., Ryu, G.H., Lee, Z., Kim, H., Cho, J.H., Ahn, J.-H. and Lee, C., 2014. Synthesis of wafer-scale uniform molybdenum disulfide films with control over the layer number using a gas phase sulfur precursor. *Nanoscale*, 6(5), 2821-2826.
- Lee, Y., Park, S., Kim, H., Han, G.H., Lee, Y.H. and Kim, J., 2015. Characterization of the structural defects in cvd-grown monolayered mos 2 using near-field photoluminescence imaging. *Nanoscale*, 7(28), 11909-11914.
- Lee, Y.H., Zhang, X.Q., Zhang, W., Chang, M.T., Lin, C.T., Chang, K.D., Yu, Y.C., Wang, J.T.W., Chang, C.S. and Li, L.J., 2012. Synthesis of large-area mos2 atomic layers with chemical vapor deposition. *Advanced Materials*, 24(17), 2320-2325.
- Lehmann, V. and Gösele, U., 1991. Porous silicon formation: A quantum wire effect. *Applied Physics Letters*, 58(8), 856-858.
- Lehmann, V., Hofmann, F., Möller, F. and Grüning, U., 1995. Resistivity of porous silicon: A surface effect. *Thin Solid Films*, 255(1-2), 20-22.
- Li, B., Shi, G., Lei, S.D., He, Y.M., Gao, W.L., Gong, Y.J., Ye, G.L., Zhou, W., Keyshar, K., Hao, J., Dong, P., Ge, L.H., Lou, J., Kono, J., Vajtai, R. and Ajayan, P.M., 2015. 3d band diagram and photoexcitation of 2d-3d semiconductor heterojunctions. *Nano Letters*, 15(9), 5919-5925.
- Li, F., Ma, C., Wang, H., Hu, W., Yu, W., Sheikh, A.D. and Wu, T., 2015. Ambipolar solution-processed hybrid perovskite phototransistors. *Nature Communications*, 6, 8238.
- Li, H., Shi, Y., Chiu, M.-H. and Li, L.-J., 2015. Emerging energy applications of two-dimensional layered transition metal dichalcogenides. *Nano Energy*, 18, 293-305.
- Li, L., Yu, Y., Ye, G.J., Ge, Q., Ou, X., Wu, H., Feng, D., Chen, X.H. and Zhang, Y., 2014. Black phosphorus field-effect transistors. *Nature nanotechnology*, 9(5), 372.
- Li, M.-Y., Shi, Y., Cheng, C.-C., Lu, L.-S., Lin, Y.-C., Tang, H.-L., Tsai, M.-L., Chu, C.-W., Wei, K.-H. and He, J.-H., 2015. Epitaxial growth of a monolayer wse2-mos2 lateral pn junction with an atomically sharp interface. *Science*, 349(6247), 524-528.
- Li, S.-L., Miyazaki, H., Song, H., Kuramochi, H., Nakaharai, S. and Tsukagoshi, K., 2012. Quantitative raman spectrum and reliable thickness identification for atomic layers on insulating substrates. *Acs Nano*, 6(8), 7381-7388.
- Li, X. and Zhu, H., 2015. Two-dimensional mos2: Properties, preparation, and applications. *Journal of Materiomics*, 1(1), 33-44.
- Liang, F., Xu, H., Wu, X., Wang, C., Luo, C. and Zhang, J., 2018. Raman spectroscopy characterization of two-dimensional materials. *Chinese Physics B*, 27(3), 037802.

- Ligenza, J. and Spitzer, W., 1960. The mechanisms for silicon oxidation in steam and oxygen. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 14, 131-136.
- Lim, Y.R., Song, W., Han, J.K., Lee, Y.B., Kim, S.J., Myung, S., Lee, S.S., An, K.S., Choi, C.J. and Lim, J., 2016. Wafer-scale, homogeneous mos2 layers on plastic substrates for flexible visible-light photodetectors. *Advanced Materials*, 28(25), 5025-5030.
- Lin, M.-W., Liu, L., Lan, Q., Tan, X., Dhindsa, K.S., Zeng, P., Naik, V.M., Cheng, M.M.-C. and Zhou, Z., 2012. Mobility enhancement and highly efficient gating of monolayer mos2 transistors with polymer electrolyte. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(34), 345102.
- Lin, S., Wang, P., Li, X., Wu, Z., Xu, Z., Zhang, S. and Xu, W., 2015. Gate tunable monolayer mos2/inp heterostructure solar cells. *Applied Physics Letters*, 107(15), 153904.
- Lin, Y.-C., Zhang, W., Huang, J.-K., Liu, K.-K., Lee, Y.-H., Liang, C.-T., Chu, C.-W. and Li, L.-J., 2012. Wafer-scale mos 2 thin layers prepared by moo 3 sulfurization. *Nanoscale*, 4(20), 6637-6641.
- Lin, Z., Zhao, Y., Zhou, C., Zhong, R., Wang, X., Tsang, Y.H. and Chai, Y., 2015. Controllable growth of large-size crystalline mos 2 and resist-free transfer assisted with a cu thin film. *Scientific Reports*, 5, 18596.
- Liu, B., Abbas, A. and Zhou, C., 2017. Two-dimensional semiconductors: From materials preparation to electronic applications. *Advanced Electronic Materials*, 3(7), 1700045.
- Liu, B., Chen, L., Liu, G., Abbas, A.N., Fathi, M. and Zhou, C., 2014. High-performance chemical sensing using schottky-contacted chemical vapor deposition grown monolayer mos2 transistors. *Acs Nano*, 8(5), 5304-5314.
- Liu, B., Fathi, M., Chen, L., Abbas, A., Ma, Y. and Zhou, C., 2015. Chemical vapor deposition growth of monolayer wse2 with tunable device characteristics and growth mechanism study. *Acs Nano*, 9(6), 6119-6127.
- Liu, B., Ma, Y., Zhang, A., Chen, L., Abbas, A.N., Liu, Y., Shen, C., Wan, H. and Zhou, C., 2016. High-performance wse2 field-effect transistors via controlled formation of in-plane heterojunctions. *Acs Nano*, 10(5), 5153-5160.
- Liu, H. and Ye, P.D.D., 2012. Mos2 dual-gate mosfet with atomic-layer-deposited al2o3 as top-gate dielectric. *Ieee Electron Device Letters*, 33(4), 546-548.
- Liu, W., Kang, J., Cao, W., Sarkar, D., Khatami, Y., Jena, D. and Banerjee, K., 2013. High-performance few-layer-mos 2 field-effect-transistor with record low contact-resistance. In 2013 IEEE International Electron Devices Meeting. IEEE: pp: 19.14. 11-19.14. 14.
- Liu, X., Hu, J., Yue, C., Della Fera, N., Ling, Y., Mao, Z. and Wei, J., 2014. High performance field-effect transistor based on multilayer tungsten disulfide. *Acs Nano*, 8(10), 10396-10402.
- Liu, Y., Weiss, N.O., Duan, X., Cheng, H.-C., Huang, Y. and Duan, X., 2016. Van der waals heterostructures and devices. *Nature Reviews Materials*, 1(9), 1-17.
- Liu, Y., Wu, H., Cheng, H.-C., Yang, S., Zhu, E., He, Q., Ding, M., Li, D., Guo, J. and Weiss, N.O., 2015. Toward barrier free contact to molybdenum disulfide using graphene electrodes. *Nano Letters*, 15(5), 3030-3034.
- Lv, Q. and Lc, R.T., 2019. Two-dimensional heterostructures based on graphene and transition metal dichalcogenides: Synthesis, transfer and applications. *Carbon*, 145, 240-250.
- Ma, Y., Liu, B., Zhang, A., Chen, L., Fathi, M., Shen, C., Abbas, A.N., Ge, M., Mecklenburg, M. and Zhou, C., 2015. Reversible semiconducting-to-metallic phase transition in chemical vapor deposition grown monolayer wse2 and applications for devices. *Acs Nano*, 9(7), 7383-7391.
- Mak, K.F., Lee, C., Hone, J., Shan, J. and Heinz, T.F., 2010. Atomically thin mos 2: A new direct-gap semiconductor. *Physical review letters*, 105(13), 136805.
- Mak, K.F. and Shan, J., 2016. Photonics and optoelectronics of 2d semiconductor transition metal dichalcogenides. *Nature Photonics*, 10(4), 216.

- Mareš, J., Křištofik, J., Pangrac, J. and Hospodkova, A., 1993. On the transport mechanism in porous silicon. *Applied Physics Letters*, 63(2), 180-182.
- Martella, C., Melloni, P., Cinquanta, E., Cianci, E., Alia, M., Longo, M., Lamperti, A., Vangelista, S., Fanciulli, M. and Molle, A., 2016. Engineering the growth of mos2 via atomic layer deposition of molybdenum oxide film precursor. *Advanced Electronic Materials*, 2(10), 1600330.
- Moriya, R., Yamaguchi, T., Inoue, Y., Morikawa, S., Sata, Y., Masubuchi, S. and Machida, T., 2014. Large current modulation in exfoliated-graphene/mos2/metal vertical heterostructures. *Applied Physics Letters*, 105(8).
- Muratore, C., Varshney, V., Gengler, J.J., Hu, J., Bultman, J.E., Roy, A.K., Farmer, B.L. and Voevodin, A.A., 2014. Thermal anisotropy in nano-crystalline mos 2 thin films. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(3), 1008-1014.
- Myong, S.Y., Kim, S.S. and Lim, K.S., 2004. In situ ultraviolet treatment in an ar ambient upon p-type hydrogenated amorphous silicon-carbide windows of hydrogenated amorphous silicon based solar cells. *Applied Physics Letters*, 84(26), 5416-5418.
- Najmaei, S., Liu, Z., Zhou, W., Zou, X., Shi, G., Lei, S., Yakobson, B.I., Idrobo, J.-C., Ajayan, P.M. and Lou, J., 2013. Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers. *Nature materials*, 12(8), 754-759.
- Neto, A.C., Guinea, F., Peres, N.M., Novoselov, K.S. and Geim, A.K., 2009. The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), 109.
- Ngankeu, A.S., 2017. Study of the electronic properties of three-and two-dimensional transition metal dichalcogenides.
- Ni, Z., Wang, H., Zhao, Q., Zhang, J., Wei, Z., Dong, H. and Hu, W., 2019. Ambipolar conjugated polymers with ultrahigh balanced hole and electron mobility for printed organic complementary logic via a two-step c□ h activation strategy. *Advanced Materials*, 31(10), 1806010.
- Nicolosi, V., Chhowalla, M., Kanatzidis, M.G., Strano, M.S. and Coleman, J.N., 2013. Liquid exfoliation of layered materials. *Science*, 340(6139), 1226419.
- Novoselov, K.S., Fal'ko, V.I., Colombo, L., Gellert, P.R., Schwab, M.G. and Kim, K., 2012. A roadmap for graphene. *Nature*, 490(7419), 192-200.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S., Jiang, D., Katsnelson, M.I., Grigorieva, I., Dubonos, S., Firsov and AA, 2005. Two-dimensional gas of massless dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V. and Firsov, A.A., 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669.
- Novoselov, K.S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T., Khotkevich, V., Morozov, S. and Geim, A.K., 2005. Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.
- Novoselov, K.S., Mishchenko, A., Carvalho, A. and Neto, A.H.C., 2016. 2d materials and van der waals heterostructures. *Science*, 353(6298).
- O'Brien, M., McEvoy, N., Hanlon, D., Lee, K., Gatensby, R., Coleman, J.N. and Duesberg, G.S., 2015. Low wavenumber raman spectroscopy of highly crystalline mose2 grown by chemical vapor deposition. *physica status solidi (b)*, 252(11), 2385-2389.
- Orofeo, C.M., Suzuki, S., Sekine, Y. and Hibino, H., 2014. Scalable synthesis of layer-controlled ws2 and mos2 sheets by sulfurization of thin metal films. *Applied Physics Letters*, 105(8), 083112.
- Podberezskaya, N., Magarill, S., Pervukhina, N. and Borisov, S., 2001. Crystal chemistry of dichalcogenides mx2. *Journal of Structural Chemistry*, 42(4), 654-681.
- Pudasaini, P.R., Oyedele, A., Zhang, C., Stanford, M.G., Cross, N., Wong, A.T., Hoffman, A.N., Xiao, K., Duscher, G. and Mandrus, D.G., 2018. High-performance multilayer wse 2 field-effect transistors with carrier type control. *Nano Research*, 11(2), 722-730.

- Pulsford, N., Rikken, G., Kessener, Y., Lous, E. and Venhuizen, A., 1994. Behavior of a rectifying junction at the interface between porous silicon and its substrate. *Journal of Applied Physics*, 75(1), 636-638.
- Qian, Y., Van Ngoc, H. and Kang, D.J., 2017. Growth of graphene/h-bn heterostructures on recyclable pt foils by one-batch chemical vapor deposition. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.
- Radisavljevic, B., Radenovic, A., Brivio, J., Giacometti, V. and Kis, A., 2011. Single-layer mos2 transistors. *Nature nanotechnology*, 6(3), 147-150.
- Ray, A., Mabrook, M., Nabok, A. and Brown, S., 1998. Transport mechanisms in porous silicon. *Journal of Applied Physics*, 84(6), 3232-3235.
- Remaki, B., Populaire, C., Lysenko, V. and Barbier, D., 2003. Electrical barrier properties of meso-porous silicon. *Materials Science and Engineering: B*, 101(1-3), 313-317.
- Ren, Y., Yang, X., Zhou, L., Mao, J.Y., Han, S.T. and Zhou, Y., 2019. Recent advances in ambipolar transistors for functional applications. *Advanced Functional Materials*, 29(40), 1902105.
- Rigi, V.C., Jayaraj, M. and Saji, K., 2020. Envisaging radio frequency magnetron sputtering as an efficient method for large scale deposition of homogeneous two dimensional mos2. *Applied Surface Science*, 147158.
- Roy, T., Tosun, M., Cao, X., Fang, H., Lien, D.-H., Zhao, P., Chen, Y.-Z., Chueh, Y.-L., Guo, J. and Javey, A., 2015. Dual-gated mos2/wse2 van der waals tunnel diodes and transistors. *Acs Nano*, 9(2), 2071-2079.
- Roy, T., Tosun, M., Kang, J.S., Sachid, A.B., Desai, S.B., Hettick, M., Hu, C.M.C. and Javey, A., 2014. Field-effect transistors built from all two-dimensional material components. *Acs Nano*, 8(6), 6259-6264.
- RoyChaudhuri, C., 2015. A review on porous silicon based electrochemical biosensors: Beyond surface area enhancement factor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 210, 310-323.
- Rupp, K., Years of microprocessor trend data, 2018. <https://www.karlsruhp.net/2018/02/42-years-of-microprocessor-trend-data> (16.06.202).
- Sahoo, P.K., Memaran, S., Xin, Y., Balicas, L. and Gutierrez, H.R., 2018. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*, 553(7686), 63-+.
- Sarkar, D., Liu, W., Xie, X., Anselmo, A.C., Mitragotri, S. and Banerjee, K., 2014. Mos2 field-effect transistor for next-generation label-free biosensors. *Acs Nano*, 8(4), 3992-4003.
- Schulman, D.S., Arnold, A.J. and Das, S., 2018. Contact engineering for 2d materials and devices. *Chemical Society Reviews*, 47(9), 3037-3058.
- Schwierz, F., 2010. Graphene transistors. *Nature nanotechnology*, 5(7), 487.
- Serna, M.I., Yoo, S.H., Moreno, S., Xi, Y., Oviedo, J.P., Choi, H., Alshareef, H.N., Kim, M.J., Minary-Jolandan, M. and Quevedo-Lopez, M.A., 2016. Large-area deposition of mos2 by pulsed laser deposition with in situ thickness control. *Acs Nano*, 10(6), 6054-6061.
- Shi, J., Ma, D., Han, G.-F., Zhang, Y., Ji, Q., Gao, T., Sun, J., Song, X., Li, C. and Zhang, Y., 2014. Controllable growth and transfer of monolayer mos2 on au foils and its potential application in hydrogen evolution reaction. *Acs Nano*, 8(10), 10196-10204.
- Shi, J., Yang, Y., Zhang, Y., Ma, D., Wei, W., Ji, Q., Zhang, Y., Song, X., Gao, T. and Li, C., 2015. Monolayer mos2 growth on au foils and on-site domain boundary imaging. *Advanced Functional Materials*, 25(6), 842-849.
- Shih, C.J., Wang, Q.H., Son, Y., Jin, Z., Blankshtein, D. and Strano, M.S., 2014. Tuning on-off current ratio and field-effect mobility in a mos2-graphene heterostructure via schottky barrier modulation. *Acs Nano*, 8(6), 5790-5798.
- Shim, J., Kim, H.S., Shim, Y.S., Kang, D.H., Park, H.Y., Lee, J., Jeon, J., Jung, S.J., Song, Y.J., Jung, W.S., Lee, J., Park, S., Kim, J., Lee, S., Kim, Y.H. and Park, J.H., 2016. Extremely large gate modulation in vertical graphene/wse2 heterojunction barristor based on a novel transport mechanism. *Advanced Materials*, 28(26), 5293-+.

- Shim, J., Park, H.Y., Kang, D.H., Kim, J.O., Jo, S.H., Park, Y. and Park, J.H., 2017. Electronic and optoelectronic devices based on two-dimensional materials: From fabrication to application. *Advanced Electronic Materials*, 3(4).
- Singh, A.K., Kumar, P., Late, D., Kumar, A., Patel, S. and Singh, J., 2018. 2d layered transition metal dichalcogenides (mos2): Synthesis, applications and theoretical aspects. *Applied Materials Today*, 13, 242-270.
- Singh, E. and Nalwa, H.S., 2015. Graphene-based bulk-heterojunction solar cells: A review. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 15(9), 6237-6278.
- Smithe, K.K., Suryavanshi, S.V., Muñoz Rojo, M., Tedjarati, A.D. and Pop, E., 2017. Low variability in synthetic monolayer mos2 devices. *Acs Nano*, 11(8), 8456-8463.
- Song, J.-G., Park, J., Lee, W., Choi, T., Jung, H., Lee, C.W., Hwang, S.-H., Myoung, J.M., Jung, J.-H. and Kim, S.-H., 2013. Layer-controlled, wafer-scale, and conformal synthesis of tungsten disulfide nanosheets using atomic layer deposition. *Acs Nano*, 7(12), 11333-11340.
- Stievenard, D. and Deresmes, D., 1995. Are electrical properties of an aluminum–porous silicon junction governed by dangling bonds? *Applied Physics Letters*, 67(11), 1570-1572.
- Su, X., Zhang, R., Guo, C., Guo, M. and Ren, Z., 2014. Quantum wells formed in transition-metal dichalcogenide nanosheet-superlattices: Stability and electronic structures from first principles. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(4), 1393-1398.
- Tangi, M., Mishra, P., Ng, T.K., Hedhili, M.N., Janjua, B., Alias, M.S., Anjum, D.H., Tseng, C.-C., Shi, Y. and Joyce, H.J., 2016. Determination of band offsets at gan/single-layer mos2 heterojunction. *Applied Physics Letters*, 109(3), 032104.
- Tian, H., Chin, M.L., Najmaei, S., Guo, Q.S., Xia, F.N., Wang, H. and Dubey, M., 2016. Optoelectronic devices based on two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nano Research*, 9(6), 1543-1560.
- Tongay, S., Zhou, J., Ataca, C., Lo, K., Matthews, T.S., Li, J., Grossman, J.C. and Wu, J., 2012. Thermally driven crossover from indirect toward direct bandgap in 2d semiconductors: Mose2 versus mos2. *Nano Letters*, 12(11), 5576-5580.
- Torres-Costa, V., Agulló-Rueda, F., Martín-Palma, R. and Martínez-Duart, J., 2005. Porous silicon optical devices for sensing applications. *Optical materials*, 27(5), 1084-1087.
- Turner, D.R., 1958. Electropolishing silicon in hydrofluoric acid solutions. *Journal of the electrochemical Society*, 105(7), 402.
- Uhlir Jr, A., 1956. Electrolytic shaping of germanium and silicon. *Bell System Technical Journal*, 35(2), 333-347.
- Ullah, F., Senthilkumar, V., Kim, S.-H., Le, C., Rock, H., Lee, D.-Y., Park, S., Ali, A. and Kim, Y., 2016. Continuous large area few layers mos2 films by pulsed laser deposition and effect of annealing in sulfur environment. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(10), 10284-10289.
- Van Berkel, C. and Powell, M., 1987. Resolution of amorphous silicon thin-film transistor instability mechanisms using ambipolar transistors. *Applied Physics Letters*, 51(14), 1094-1096.
- Van Der Zande, A.M., Huang, P.Y., Chenet, D.A., Berkelbach, T.C., You, Y., Lee, G.-H., Heinz, T.F., Reichman, D.R., Muller, D.A. and Hone, J.C., 2013. Grains and grain boundaries in highly crystalline monolayer molybdenum disulphide. *Nature materials*, 12(6), 554-561.
- Wachter, S., Polyushkin, D.K., Bethge, O. and Mueller, T., 2017. A microprocessor based on a two-dimensional semiconductor. *Nature Communications*, 8(1), 1-6.
- Wallace, P.R., 1947. The band theory of graphite. *Physical Review*, 71(9), 622.
- Wang, H., Yu, L., Lee, Y.-H., Shi, Y., Hsu, A., Chin, M.L., Li, L.-J., Dubey, M., Kong, J. and Palacios, T., 2012. Integrated circuits based on bilayer mos2 transistors. *Nano Letters*, 12(9), 4674-4680.

- Wang, J., Yao, Q., Huang, C.W., Zou, X., Liao, L., Chen, S., Fan, Z., Zhang, K., Wu, W. and Xiao, X., 2016. High mobility mos2 transistor with low schottky barrier contact by using atomic thick h-bn as a tunneling layer. *Advanced Materials*, 28(37), 8302-8308.
- Wang, Q.H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J.N. and Strano, M.S., 2012. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature nanotechnology*, 7(11), 699.
- Wang, X., Li, T., Ma, H., Zhai, D., Jiang, C., Chang, J., Wang, J. and Wu, C., 2017. A 3d-printed scaffold with mos 2 nanosheets for tumor therapy and tissue regeneration. *NPG Asia Materials*, 9(4), e376-e376.
- Wang, Z., Li, Q., Chen, Y., Cui, B., Li, Y., Besenbacher, F. and Dong, M., 2018. The ambipolar transport behavior of wse 2 transistors and its analogue circuits. *NPG Asia Materials*, 10(8), 703-712.
- Wei, J.Q., Wang, F., Zhang, B.J., Shan, X., Di, X.C., Li, Y., Feng, Y.L. and Zhang, K.L., 2019. High-performance fet arrays enabled by improved uniformity of wafer-scale mos2 synthesized via thermal vapor sulfurization. *Applied Surface Science*, 483, 1136-1141.
- Wilson, J.A. and Yoffe, A., 1969. The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties. *Advances in Physics*, 18(73), 193-335.
- Wu, T., Zhang, X., Yuan, Q., Xue, J., Lu, G., Liu, Z., Wang, H., Wang, H., Ding, F. and Yu, Q., 2016. Fast growth of inch-sized single-crystalline graphene from a controlled single nucleus on cu-ni alloys. *Nature materials*, 15(1), 43.
- Wu, W., De, D., Chang, S.-C., Wang, Y., Peng, H., Bao, J. and Pei, S.-S., 2013. High mobility and high on/off ratio field-effect transistors based on chemical vapor deposited single-crystal mos2 grains. *Applied Physics Letters*, 102(14), 142106.
- Xia, F., Wang, H., Xiao, D., Dubey, M. and Ramasubramaniam, A., 2014. Two-dimensional material nanophotonics. *Nature Photonics*, 8(12), 899-907.
- Xie, C., Mak, C., Tao, X. and Yan, F., 2017. Photodetectors based on two-dimensional layered materials beyond graphene. *Advanced Functional Materials*, 27(19), 1603886.
- Xu, H., Zhang, H., Guo, Z., Shan, Y., Wu, S., Wang, J., Hu, W., Liu, H., Sun, Z. and Luo, C., 2018. High-performance wafer-scale mos2 transistors toward practical application. *small*, 14(48), 1803465.
- Yang, H., Qin, S., Zheng, X., Wang, G., Tan, Y., Peng, G. and Zhang, X., 2017. An al2o3 gating substrate for the greater performance of field effect transistors based on two-dimensional materials. *Nanomaterials*, 7(10), 286.
- Yang, T., Zheng, B., Wang, Z., Xu, T., Pan, C., Zou, J., Zhang, X., Qi, Z., Liu, H. and Feng, Y., 2017. Van der waals epitaxial growth and optoelectronics of large-scale wse 2/sns 2 vertical bilayer p-n junctions. *Nature Communications*, 8(1), 1-9.
- Yang, Y., Huang, L., Xiao, Y., Li, Y., Zhao, Y., Luo, D., Tao, L., Zhang, M., Feng, T. and Zheng, Z., 2018. Tunable polarity behavior and high-performance photosensitive characteristics in schottky-barrier field-effect transistors based on multilayer ws2. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 10(3), 2745-2751.
- Yarbrough, K.A., Pradhan, S.K., Kogo, G., Roul, M., Lin, P.T., Zhang, K., Baumgart, H. and Bahoura, M., 2019. Thickness controlled nanostructure formation in rf sputtered ws2 thin film. *Materials Research Express*, 6(2).
- Yu, H., Liao, M., Zhao, W., Liu, G., Zhou, X., Wei, Z., Xu, X., Liu, K., Hu, Z. and Deng, K., 2017. Wafer-scale growth and transfer of highly-oriented monolayer mos2 continuous films. *Acs Nano*, 11(12), 12001-12007.
- Yu, J.H., Lee, H.R., Hong, S.S., Kong, D., Lee, H.-W., Wang, H., Xiong, F., Wang, S. and Cui, Y., 2015. Vertical heterostructure of two-dimensional mos2 and wse2 with vertically aligned layers. *Nano Letters*, 15(2), 1031-1035.
- Yu, L., El-Damak, D., Radhakrishna, U., Ling, X., Zubair, A., Lin, Y., Zhang, Y., Chuang, M.-H., Lee, Y.-H. and Antoniadis, D., 2016. Design, modeling, and fabrication of chemical

- vapor deposition grown mos2 circuits with e-mode fets for large-area electronics. *Nano Letters*, 16(10), 6349-6356.
- Yu, L., Zubair, A., Santos, E.J., Zhang, X., Lin, Y., Zhang, Y. and Palacios, T., 2015. High-performance wse2 complementary metal oxide semiconductor technology and integrated circuits. *Nano Letters*, 15(8), 4928-4934.
- Yu, Y., Li, C., Liu, Y., Su, L., Zhang, Y. and Cao, L., 2013. Controlled scalable synthesis of uniform, high-quality monolayer and few-layer mos 2 films. *Scientific Reports*, 3, 1866.
- Zhan, Y., Liu, Z., Najmaei, S., Ajayan, P.M. and Lou, J., 2012. Large-area vapor-phase growth and characterization of mos2 atomic layers on a sio2 substrate. *small*, 8(7), 966-971.
- Zhang, J., Wang, J., Chen, P., Sun, Y., Wu, S., Jia, Z., Lu, X., Yu, H., Chen, W. and Zhu, J., 2016. Observation of strong interlayer coupling in mos2/ws2 heterostructures. *Advanced Materials*, 28(10), 1950-1956.
- Zhang, K., Jariwala, B., Li, J., Briggs, N.C., Wang, B., Ruzmetov, D., Burke, R.A., Lerach, J.O., Ivanov, T.G. and Haque, M., 2018. Large scale 2d/3d hybrids based on gallium nitride and transition metal dichalcogenides. *Nanoscale*, 10(1), 336-341.
- Zhang, W., Huang, J.K., Chen, C.H., Chang, Y.H., Cheng, Y.J. and Li, L.J., 2013. High-gain phototransistors based on a cvd mos2 monolayer. *Advanced Materials*, 25(25), 3456-3461.
- Zhang, X., Choudhury, T.H., Chubarov, M., Xiang, Y., Jariwala, B., Zhang, F., Alem, N., Wang, G.-C., Robinson, J.A. and Redwing, J.M., 2018. Diffusion-controlled epitaxy of large area coalesced wse2 monolayers on sapphire. *Nano Letters*, 18(2), 1049-1056.
- Zhang, X., Liao, Q., Kang, Z., Liu, B., Ou, Y., Du, J., Xiao, J., Gao, L., Shan, H. and Luo, Y., 2019. Self-healing originated van der waals homojunctions with strong interlayer coupling for high-performance photodiodes. *Acs Nano*, 13(3), 3280-3291.
- Zhang, Y., Tan, Y.-W., Stormer, H.L. and Kim, P., 2005. Experimental observation of the quantum hall effect and berry's phase in graphene. *Nature*, 438(7065), 201.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Ji, Q., Ju, J., Yuan, H., Shi, J., Gao, T., Ma, D., Liu, M. and Chen, Y., 2013. Controlled growth of high-quality monolayer ws2 layers on sapphire and imaging its grain boundary. *Acs Nano*, 7(10), 8963-8971.
- Zhang, Y.J., Ye, J.T., Matsushashi, Y. and Iwasa, Y., 2012. Ambipolar mos2 thin flake transistors. *Nano Letters*, 12(3), 1136-1140.
- Zhang, Z., Chen, P., Duan, X., Zang, K., Luo, J. and Duan, X., 2017. Robust epitaxial growth of two-dimensional heterostructures, multiheterostructures, and superlattices. *Science*, 357(6353), 788-792.
- Zhao, W.J., Ghorannevis, Z., Chu, L.Q., Toh, M.L., Kloc, C., Tan, P.H. and Eda, G., 2013. Evolution of electronic structure in atomically thin sheets of ws2 and wse2. *Acs Nano*, 7(1), 791-797.
- Zhao, Y., Qiao, J., Yu, Z., Yu, P., Xu, K., Lau, S.P., Zhou, W., Liu, Z., Wang, X. and Ji, W., 2017. High-electron-mobility and air-stable 2d layered ptse2 fets. *Advanced Materials*, 29(5), 1604230.
- Zhu, W., Yogeesh, M.N., Yang, S., Aldave, S.H., Kim, J.-S., Sonde, S., Tao, L., Lu, N. and Akinwande, D., 2015. Flexible black phosphorus ambipolar transistors, circuits and am demodulator. *Nano Letters*, 15(3), 1883-1890.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Merve ACAR
Doğum tarihi:	01.07.1990
Doğum Yeri:	Erzurum
Uyruğu:	T.C
Adres:	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
E-mail:	merve.acar@atauni.edu.tr
Eğitim	
Lise:	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2012)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı (2014)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı (2020)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
<u>SCI Kapsamında Makaleler</u>	
1. Acar, M., Mobtakeri, S., Efeoğlu, H., Ertuğrul, M. and Gür, E., 2020. Single-step, Large-area, Variable Thickness Sputtered WS ₂ Film-Based Field Effect Transistors. Ceramics International.	
<u>Uluslararası Bildiriler</u>	
1. ACAR , M., MOBTAKERY, S., & GÜR, E., 2019. Field-Effect Transistors on Large Area a Few Layers WS ₂ Grown by Sputtering. ICONTRENS, Prag, Czech Republic.	
2. ACAR , M., 2018. Fabrication of WS ₂ Field Effect Device. ISASE, Erzurum, Turkey.	