



**İKİ BOYUTLU GRAFEN/ReSe₂/ReS₂
FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Büşra AYDIN DEMİR

Doktora Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



İKİ BOYUTLU GRAFEN/RESE₂/RES₂ FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

DOKTORA TEZİ
Büşra AYDIN DEMİR

Danışman: Doç Dr. Çağlar DUMAN

ERZURUM, 2025

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**İKİ BOYUTLU GRAFEN/ReSe₂/ReS₂ FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Doç. Dr. Çağlar DUMAN danışmanlığında Büşra AYDIN DEMİR tarafından hazırlanan bu çalışma 25.12.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği ile (5/5)** kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Çağlar DUMAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	İmza
Üye:	Prof. Dr. Tevhit KARACALI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	İmza
Üye:	Prof. Dr. Güven TURGUT <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	İmza
Üye:	Prof. Dr. Harun GÜNEY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	İmza
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. İlker KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 122E569 numaralı proje ile desteklenmiştir.

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından, içeriğin ve sonuçların özgünlük sorumluluğunun tarafıma ait olması ve çalışmanın bilimsel niteliğini etkilemeyecek düzeyde, yalnızca yardımcı bir araç olarak sınırlı düzeyde destek alındığını beyan ederim.

25.12.2025

İmzası

Büşra AYDIN DEMİR

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılar sağlayan, tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve sonuçlandırılması aşamalarında her zaman desteğini esirgemeyen, sabrı ve hoşgörüsüyle bana daima güven veren kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Çağlar DUMAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesinde yer alarak çalışmamı yakından takip eden, yapıcı eleştirileri ve yol gösterici önerileriyle tezimin gelişimine önemli katkılar sunan Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a ve Sayın Prof. Dr. Güven TURGUT'a teşekkür ederim.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122E569 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

SCAPS-1D yazılım paketini sağladıkları için Belçika Gent Üniversitesi'nden Dr. Marc Burgelman ve ekibine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, sevgileri, sabırları ve fedakarlıklarıyla beni bugünlere getiren kıymetli aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

Doktora sürecim boyunca her zaman yanımda olan, anlayışı, sabrı ve desteğiyle bana güç veren, sevgisiyle en büyük motivasyon kaynağım olan sevgili eşim Dr. Yasin DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Büşra AYDIN DEMİR

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İKİ BOYUTLU GRAFEN/ReSe₂/ReS₂ FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Büşra AYDIN DEMİR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Çağlar DUMAN

Tez çalışması kapsamında, SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak p-cSi/PSi/ReSe₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapıları simüle edilmiştir. Simüle edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı için p-cSi/PSi/ReSe₂/Grafen yapısına kıyasla daha yüksek performans elde edilmiştir. 550 nm’de % 96,37 EQE ve 790 nm’de 0,54 A/W R elde edilmiştir. Bu sebeple Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı deneysel olarak üretilmiştir. Ayrıca bu yapıya ek olarak Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısı deneysel olarak üretilip incelenmiştir.

Aygıt fabrikasyonunda kullanılan, 2B ReSe₂ ve ReS₂ tabakaları CVD metodu ile üretilmiştir. CVD metodu, cihaz uygulamaları için ölçeklenebilir, yüksek kaliteli ReX₂ üretim imkanı sunduğu için tercih edilmiştir. Grafen elektrotlar ise ticari olarak satın alınan Grafen filmlerden elde edilmiştir. Grafen film, SiO₂/p-Si alttaş üzerine PMMA kullanılarak transfer edilmiştir. Daha sonra litografi ve ICP-RIE ile istenilen boyutlarda Grafen şeritler oluşturulmuştur. CVD tekniği kullanılarak cihaz tasarımına uygun kontrollü biçimde büyütülen ReSe₂, ReS₂ pulları ve Grafen şeritler PDMS kullanılarak SiO₂/p-Si alttaş üzerinde üst üste yerleştirilmiştir. Metalizasyon işlemi sonrasında ise fotodedektör yapısı elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda, Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ aygıt yapılarını inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Üretilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör ile VIS’den NIR’e (510 nm-1550 nm) geniş bir spektral algılama yapılabilmektedir. Bu durum, 2B ReSe₂/ReS₂ malzemelerinin kesim frekanslarının üzerindeki frekanslarda Grafen’in foton absorbe etmesi ve taşıyıcı üretmesi ile açıklanmaktadır. Dolayısıyla, bu frekanslarda Grafen sadece elektrot olarak değil aynı zamanda fotodedektör gibi davranmıştır. Tez kapsamında üretilen fotodedektör ile 10⁴ A/W’nin mertebesinde duyarlılık elde edilmiştir. Yüksek duyarlılığın sonucu olarak % 4.8×10⁴ EQE ve 3,6×10¹² Jones D* hesaplanmıştır. Ayrıca üretilen cihazın harici güç kaynağı kullanılmadan algılama yapabildiği görülmüştür. Üretilen fotodedektörün geniş dalga boyu aralığında algılama yapabilmesi bu tip fotodedektörler kuantum haberleşme, otonom araçlar, akıllı tarım, gece görüş sistemleri, uzay ve uydu tabanlı algılama gibi ileri teknolojik alanlarda kullanıldığı için önemlidir. Ayrıca, üretilen aygıtın harici güç kaynağı kullanılmadan çalışması enerji verimliliği açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: 2B Malzemeler, TMDC, CVD, ReSe₂, ReS₂, Grafen, Fotodedektör.

ABSTRACT

PhD THESIS

TWO DIMENSIONAL GRAPHENE/ReSe₂/ReS₂ PHOTODETECTOR FABRICATION AND CHARACTERIZATION

Büşra AYDIN DEMİR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çağlar DUMAN

As part of the thesis, the structures of p-cSi/PSi/ReS₂/graphene and graphene/ReSe₂/ReS₂ were simulated using the SCAPS-1D software package. For the simulated graphene/ReSe₂/ReS₂ structure, higher performance was achieved compared to the p-cSi/PSi/ReS₂/graphene structure. At 550 nm, an EQE of 96.37% was achieved, and at 790 nm, a responsivity of 0.54 A/W was obtained. For this reason, the graphene/ReSe₂/ReS₂ structure was experimentally produced. Additionally, in addition to this structure, graphene/ReSe₂/ReS₂/graphene was experimentally fabricated and investigated.

The 2D ReSe₂ and ReS₂ used in the fabrication were synthesized via the CVD method. The CVD method was preferred due to its capability to produce high-quality ReX₂ structures with scalable growth suitable for device applications. The graphene electrodes were derived from commercially purchased graphene films. These films were transferred onto a SiO₂/p-Si substrate using PMMA-assisted wet transfer. Subsequently, graphene stripes of the desired dimensions were patterned using photolithography and ICP-RIE etching. The ReSe₂ and ReS₂ flakes, grown in a controlled manner via the CVD technique to suit the device architecture, were sequentially stacked over the graphene stripes on the SiO₂/p-Si substrate using PDMS-assisted dry transfer. After metallization, the photodetector structure was completed. A comprehensive literature review revealed no prior studies investigating the graphene/ReSe₂/ReS₂/graphene and graphene/ReSe₂/ReS₂ device architectures. The fabricated graphene/ReSe₂/ReS₂ photodetector demonstrated broadband photodetection performance from the visible to near-infrared spectral range (510 nm-1550 nm). This broadband response is attributed to the photon absorption and carrier generation by the graphene at frequencies beyond the cut-off of the ReSe₂ and ReS₂ layers, indicating that graphene functions not only as an electrode but also as an active photodetection layer at higher frequencies.

A high responsivity of approximately 10⁴ A/W was achieved with the fabricated photodetector. As a result, an EQE of 4.8×10⁴ % and a detectivity of 3.6×10¹² Jones were calculated. Additionally, it was observed that the fabricated device could operate in a self-driven mode without requiring an external power supply. The ability of the device to detect across a broad wavelength range is significant for applications in advanced technologies such as quantum communication, autonomous vehicles, smart agriculture, night vision systems, and space or satellite-based sensing. Moreover, its self-powered operation highlights its potential for energy efficient optoelectronic applications.

Keywords: 2D Materials, TMDC, CVD, ReSe₂, ReS₂, Graphene, Photodetector.

İÇİNDEKİLER

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Kaynak Özetleri.....	5
1.3. Tezin Literatüre Katkıları	9
1.4. Tezin Akışı	10
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
2.1. 2B ReS ₂ ve ReSe ₂ Yapılarının Özellikleri	12
2.1.1. Kristal Yapı.....	12
2.1.2. Elektronik Bant Yapısı	15
2.1.3. Optik Özellikler	17
2.2. 2B ReS ₂ ve ReSe ₂ Yapılarının Üretim Yöntemleri	18
2.2.1. 2B ReS ₂ ve ReSe ₂ Yapılarının CVD Yöntemi ile Üretimi	19
2.3. 2B Malzemelerin Transfer Yöntemleri	24
2.4. Fotodedektörler	26
2.5. 2B Malzeme Tabanlı Aygıtların Modellenmesi	32
3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	34
3.1. SCAPS-1D ile 2B Tabanlı Fotonik Aygıt Modellenmesi	34
3.2. ReSe ₂ Yapılarının CVD ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu.....	37
3.3. ReS ₂ Pullarının CVD Metodu ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu	42
3.4. Grafen Filmin Desenlenmesi ve Transfer Süreci	47
3.5. Kuru Transfer ile 2B Malzemelerin İstiflenmesi ve Metalizasyon	57
3.6. 2B Fotodedektör Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu.....	63
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKÇA	71

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR.....	80
1. Makaleler.....	80
2. Bildiriler	80
3. Diğer Makaleler.....	80
4. Diğer Bildiriler	80



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. 2B TMDC Transfer Yöntemleri (Castellanos-Gomez et al., 2014; Li et al., 2019; Kim et al., 2020; Jang et al., 2022; Liu et al., 2024; Cheliotis et al., 2024).....	25
Tablo 2. Simülasyonlarda kullanılan parametreler (Aydın and Duman, 2023)..	34
Tablo 3. Altlıkların yüzeylerinin aktifleştirilmesi için kullanılan reçete..	51
Tablo 4. Grafen tabakasının aşındırılması için kullanılan reçete.....	56



ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 1.** (a) TMDC’lerde yaygın olarak görülen üç kristal fazı: 2H, 1T ve 1T’. Her bir faz, kafes sabitleri a ve b ile tanımlanan dikdörtgen bir birim hücre ile ifade edilebilir. Burada M bir geçiş metali atomunu, X ise bir kalkojen atomunu temsil etmektedir (Duerloo et al., 2014). (b) ReS₂’nin bozulmuş 1T yapısının, 1H yapısına sahip MoS₂ ile karşılaştırmalı olarak yan (üst iki panel) ve üstten görünümü (alt iki panel) (Tongay et al., 2014)..... 12
- Şekil 2.** (a) 1T’ fazındaki ReS₂ kristalinde Re atomunun değerlik elektronlarının dizilimi. (b) Tek tabakalı ReX₂’nin atomik yapısı (Li et al., 2020) 13
- Şekil 3.** a) [001] görüntüleme yönüne sahip bozulmamış ReS₂ nanosyapıların ve b) 10 saniye Ar iyon demeti bombardımanına maruz kalmış ReS₂ nanosyapıların HRTEM görüntüleri (Huang et al., 2019). 15
- Şekil 4.** ReS₂’nin DFT ile hesaplanan tek tabakalı, üç tabakalı ve beş tabakalı elektronik bant yapısı (Liu et al., 2015)..... 16
- Şekil 5.** (a) Katmanlar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak sistemin hesaplanan toplam enerjisi. ReS₂’deki enerji eğrisi minimumunun daha sık olması ReS₂’nin MoS₂’ye kıyasla çok daha zayıf katmanlar arası bağlanma enerjisi olduğunu ifade etmektedir. (b) Farklı katman sayısına sahip ReS₂’nin PL spektrumu (Tongay et al., 2014). (c) Farklı katman sayısına sahip ReSe₂’nin PL spektrumu (Zhao et al., 2015). (d) ReS₂, ReSSe alaşımı ve ReSe₂’nin soğurma spektrumu (Liu et al., 2016)..... 17
- Şekil 6.** (a) Mekanik eksfoliasyonla 2B malzeme sentezi (Yi and Shen 2015). (b) Eksfole edilmiş birkaç katmanlı bir ReSe₂ kristalinin optik mikroskop görüntüsü (Lorchat et al., 2016). 19
- Şekil 7.** 2B ReS₂ tabakalarının (a, c, d) SiO₂/Si ve (b, e, f) sınırlı reaksiyon alanına sahip mika altlık üzerindeki büyüme davranışı (Cui et al., 2017; Qin et al., 2017). 22
- Şekil 8.** (a) Muskovit mikanın kristal yapısı. (b) Taze kesilmiş mikanın şeması. (c) K⁺ iyonlarının önerilen oksijen destekli uzaklaştırılmasının şeması (Chiu et al., 2023). 23
- Şekil 9.** 2B malzemelerin CVD ile büyüme aşamaları 24
- Şekil 10.** (a) Termal denge durumunda, (b) ileri ve (c) ters beslem koşulları altında bir p-n eklem bant diyagramlarının şematik gösterimi. Ok işaretleri boşaltılmış

bölgeyi ve bu bölgenin genişliğindeki değişimi göstermektedir (Mathew et al., 2021).....	28
Şekil 11. Tip I, tip II ve tip III bant hizalaması gösterimi. Yeşil renk, B yarı iletkeninin bant kenarı konumunu, turuncu renk ise A yarı iletkeninin bant kenarı konumunu temsil etmektedir (Feng et al., 2021).....	29
Şekil 12. ReSe ₂ / ReS ₂ enerji bant diyagramı	32
Şekil 13. (a) p-cSi/PSi/ReS ₂ /Grafen cihazının şematik yapısı ve (b) enerji bant diyagramı	35
Şekil 14. p-cSi/PSi/ReS ₂ /Grafen cihazının (a) EQE, R ve (b) J-V eğrileri	36
Şekil 15. (a) Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ cihazının şematik yapısı ve (b) enerji bant diyagramı.	36
Şekil 16. Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ cihazının (a) EQE, R ve (b) J-V eğrileri	37
Şekil 17. (a) CVD deney düzeneği. (b) CVD fırın ısıtma bölgesi. (c) Deney tüpü sıcaklığının fırın merkezine uzaklığa bağlı değişimi.....	38
Şekil 18. (a) CVD deney düzeneğinin şematiği. (b) Deney süresince fırın merkez sıcaklığının değişimi.....	39
Şekil 19. (a) Se'un fırın merkezine uzaklığı 16,5 cm ayarlandığında, (b) safir mikoreaktör kullanıldığında, (c) deney tüpü cam yünü ile sarıldığında, (d) deney süresi 8 dakika yapıldığında ve deney tüpü (e) 750 °C ve (f) 450 °C'de sürüldüğünde, (g) sıcaklık rampası 25°C/dk olarak ayarlandığında, (h) H ₂ 1,5 sccm'e düşürülüp deney süresi 10 dk'ya çıkarıldığında, (i) H ₂ 1 sccm'e düşürüldüğünde, (j) H ₂ 2 sccm'e düşürüldüğünde, (k) H ₂ 2,25 sccm'e çıkarıldığında elde edilen OM görüntüleri.	40
Şekil 20. (a)'da sunulan yapılar için ölçülen (b) Raman spektrumu.....	42
Şekil 21. (a) CVD deney düzeneği şematiği. 2B malzemenin mikoreaktör içinde ve dışındaki büyüme davranışının gösterimi. (b) Deney süresince fırın merkez sıcaklığının değişimi.....	43
Şekil 22. (a) Hava ortamında ve (b) Argon atmosferinde tavlanan mikalar için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri (S'un fırın merkezine uzaklığı 19,5 cm, ReO ₃ Miktarı 6 mg, 80/40 sccm Ar, Büyüme sıcaklığı 600°C, Deney süresi 5 dk)....	44
Şekil 23. (a) Birinci mikoreaktör, (b) ikinci mikoreaktör ve (c) üçüncü mikoreaktör için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri. (a)'da sunulan yapılar için ölçülen (d) Raman spektrumu, (e) PL spektrumu ve (f) AFM ölçümü	

(S'ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO ₃ Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Büyüme sıcaklığı 600°C, Deney süresi 5 dk).....	45
Şekil 24. (a) 550°C, (b) 575 °C, (c) 625 °C, (d) 650 °C ve (e) 675°C büyüme sıcaklığı için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri (S'ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO ₃ Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Deney süresi 5 dk). (f) PL spektrumu ölçümü.....	46
Şekil 25. ReO ₃ ve altlık arasındaki mesafe (a) 1,5 cm, (b) 2,5 (c) 0,5 cm olan deney için elde edilen OM görüntüleri (S'ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO ₃ Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Deney süresi 5 dk, Büyüme sıcaklığı 600°C).....	47
Şekil 26. PMMA destekli ıslak transfer sürecinin temel adımları.....	48
Şekil 27. Selobant destekli ıslak transfer sürecinin temel adımları	48
Şekil 28. (a) Grafen/Cu numunesinin Nitrik asit çözeltisinde yüzdürülmesi. (b) Numunenin DI su ile durulanması. (c) Numunenin tozsuz peçete üstünde kurumaya bırakılması ve uygun boyutlarda kesilmesi	49
Şekil 29. (a) PMMA çözeltisi ile numune yüzeyinin döndürülerek kaplanması. (b,c) PMMA çözeltisi ile kaplanıp 12 saat kurumaya bırakılan numuneler	49
Şekil 30. (a) FeCl ₃ tozunun tartılması. (b) FeCl ₃ tozunun DI su ile karıştırılması. (c) PMMA/Grafen/Cu ve Bant/Grafen/Cu numunelerinin FeCl ₃ çözeltisinde yüzdürülmesi	50
Şekil 31. Numunelerin bakır altlıklarının erime süreçleri	51
Şekil 32. (a, b) PMMA/Grafen ve Bant/Grafen numunelerinin, SiO ₂ /p-Si altaşa transfer edilmesi ve (c, d) numunelerin tavlanması	52
Şekil 33. (a) Çeker ocakta kurumaya bırakılan PMMA/Grafen/SiO ₂ /p-Si ve Bant/Grafen/SiO ₂ /p-Si numuneleri, (b) PMMA'nın uzaklaştırılması için aseton içinde bekletilen PMMA/Grafen/SiO ₂ /p-Si numuneler	52
Şekil 34. (a) Selobant, (b) Anisol-PMMA, (c) Aseton-PMMA ile transfer edilen numunelerin OM görüntüleri. (d) Selobant, (e) ve (f) Aseton-PMMA ile transfer edilen numunelerin SEM görüntüleri	53
Şekil 35. Selobant, Anisol-PMMA ve Aseton-PMMA numunelerinin Raman spektrumları	54
Şekil 36. (a) Altaş, fotorezist ile döndürülerek kaplanmış ve (b) AZ 1505 Fotorezist kaplanan numune litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. (c) Pozlandırılan numune banyo (develop) edilmiştir. (d) Grafen numuneleri için litografi işleminde kullanılan maske tasarımı.....	55

Şekil 37. (a) ICP-RIE ile aşındırılarak Grafen tabakası desenlenmiştir. (b) Fotorezist yüzeyden uzaklaştırıldıktan sonra elde edilen numunenin gösterimi	56
Şekil 38. (a) ICP-RIE ile oluşturulan Grafen şeritler. (b) Grafen şerit için elde edilen Raman spektrumu	56
Şekil 39. Kuru transfer işlemi için kullanılan 2B malzeme transfer sistemi ve bileşenleri	57
Şekil 40. ReSe ₂ ve ReSe ₂ yapılarının DI deliminasyon destekli kuru transfer işleminin adımları	58
Şekil 41. (a) Pul konumunun OM yardımıyla belirlenmesi, (b) transfer edilecek ReSe ₂ numuneye PDMS'in daha iyi yapışması için 3 dakika boyunca 30 gram ağırlık ile 90°C sıcaklık uygulanması, (c) numunenin 90 °C sıcaklıktaki DI suya daldırılıp 10 dakika boyunca bekletilmesi, (d) PDMS/ReSe ₂ 'nin safır alttaştan ayrılması, (e) lamel/PDMS/ReSe ₂ 'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/ReSe ₂ 'in Grafen şerit üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ReSe ₂	59
Şekil 42. (a) Pul konumunun OM yardımıyla belirlenmesi, (b) transfer edilecek ReS ₂ numuneye PDMS'in daha iyi yapışması için 3 dakika boyunca 30 gram ağırlık ile 90°C sıcaklık uygulanması, (c) numunenin 90 °C sıcaklıktaki DI suya daldırılıp 5 dakika boyunca bekletilmesi, (d) PDMS/ReS ₂ 'nin mika alttaştan ayrılması, (e) lamel/PDMS/ReS ₂ 'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/ReS ₂ 'in Grafen/ReSe ₂ yapısı üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ yapısı	60
Şekil 43. Grafen şeridin HF destekli transfer işleminin adımları	60
Şekil 44. (a) PDMS/Grafen/ SiO ₂ /p-Si üzerine SiO ₂ tabakasını eritmek amacıyla HF çözeltisinin damlatılması, (b) lamel/PDMS/Grafen'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/Grafen'in Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ /Grafen yapısı	61
Şekil 45. (a) Numune, fotorezist ile döndürülerek kaplanmıştır. (b) Fotorezist kaplanan numune maskesiz litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. Pozlandırılan numune banyo kimyasalı (developer) içinde bekletilmiş, DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (c) Termal buharlaştırıcı kullanılarak numuneye sırasıyla Krom ve Altın kaplanmıştır. Numuneler aseton içinde bekletilmiş ve Fotorezist kalıntıları kaldırılmıştır (Lift off). Daha sonra numune DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (d) Fabrikasyon	

adımları sonucunda elde edilen Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ /Grafen heteroeklem fotodedektör.....	62
Şekil 46. (a) Numune, fotorezist ile döndürülerek kaplanmıştır. (b) Fotorezist kaplanan numune maskesiz litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. Pozlandırılan numune banyo kimyasalı içinde bekletilmiş, DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (c) Termal buharlaştırıcı kullanılarak numuneye Alüminyum kaplanmıştır. Numuneler aseton içinde bekletilmiş ve Fotorezist kalıntıları kaldırılmıştır. Daha sonra numune DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (d) Fabrikasyon adımları sonucunda elde edilen Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ heteroeklem fotodedektör. Numunelerin bakır altlıklarının erime süreçleri.....	62
Şekil 47. (a) Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ /Grafen ve Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ Fotodedektörün enerji bant diyagramı.. ..	63
Şekil 48. Fotodedektör karakterizasyon deney düzeneği.....	64
Şekil 49. (a) Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ /Grafen heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü, (b) Üretilen aygıtın I-V eğrisi.	64
Şekil 50. (a) Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü, (b) Üretilen aygıtın I-V eğrisi.	65
Şekil 51. Şekil 50’de sunulan dedektör yapısı için hesaplanan NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değerleri.	66
Şekil 52. (a) Tekrar üretilen Grafen/ReSe ₂ /ReS ₂ heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü ve (b) aygıtın I-V eğrisi.	67
Şekil 53. Şekil 52’de sunulan dedektör yapısı için hesaplanan NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değerleri.	68

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

2B	İki Boyutlu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AFORSHET	Heteroyapıların Simülasyonu için Otomasyon
AMPS	Mikroelektronik ve Fotonik Yapıların Analizi
CBM	İletkenlik Bandı Minimumu
CBO	İletim Bandı Ofseti
CMOS	Tümleşik Metal-Oksit-Yarıiletken
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
CVT	Kimyasal Buhar Taşıma
DFT	Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi
DI	Deiyonize
EDS	X-Işını Spektroskopisi
EQE	Harici Kuantum Verimliliği
ETÜ	Erzurum Teknik Üniversitesi
FET	Alan Etkili Transistör
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu
ICP-RIE	Endüktif Bağlaşımli Plazma Aşındırma
IPA	İzopropil Alkol
LED	Işık Yayan Diyot
LPE	Sıvı Faz Eksfoliasyon
ME	Mekanik Eksfoliasyon
NEP	Eşdeğer Gürültü Gücü
NIR	Yakın Kızılötesi
OM	Optik Mikroskop
PC	Polikarbonat
PDMS	Polidimetilsiloksan
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PL	Fotoluminesans
PMMA	Polimetil Metakrilat
PPC	Polipropilen Karbonat
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
PVP	Polivinil Prolidon

SCAPS	Güneş Hücresi Kapasitans Simülatörü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TCAD	Bilgisayar Destekli Tasarım Teknolojisi
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
TMDC	Geçiş Metali Dikalkojenitleri
TMO	Geçiş Metali Oksitleri
UV	Ultraviyole
VBM	Değerlik Bandı Maksimumu
VBO	Değerlik Bandı Kayması
vdW	Van der Waals
VIS	Görünür
VLC	Görünür Işık Haberleşmesi
VLS	Buhar-Sıvı-Katı
VSS	Buhar-Katı-Katı
XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
YÜTAM	Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
%	Yüzde İşareti
°	Derece
µs	Mikrosaniye
A	Dedektörün Aydınlatılan Alanı
A	Akım
A _g	Düzlem Dışı Mod
Al	Alüminyum
Ar	Argon
Au	Altın
BP	Siyah Fosfor
C	Celcius
c	Işık Hızı
Cl	Klor
cm	Santimetre
Cr	Krom
Cu	Bakır
D	Göç Katsayısı
D*	Algılama Yeteneği

dk	dakika
E_g^{raman}	Düzlem İçi Mod
$E_{g\text{ReS}_2}$	ReS ₂ 'nin Bant Aralığı
$E_{g\text{ReSe}_2}$	ReSe ₂ 'nin Bant Aralığı
E_m	Göç Bariyer Enerjisi
eV	Elektrovolt
FeCl ₃	Ferrik Klorit
Ge	Germanyum
G_{op}	Optik Üretim Oranı
h	Planck Sabiti
H ₂	Hidrojen Gazı
h-BN	Altığın Bor Nitrür
HCl	Hidroklorik Asit
HF	Hidroflorik Asit
HgCdTe	Civa Kadmiyum Tellür
I	Akım
$I_{\text{karanlık}}$	Karanlık akımı
I_{ph}	Fataokım
J_n	Elektronlar Tarafından Oluşturulan Akım Yoğunluğu
J_p	Boşluklar Tarafından Oluşturulan Akım Yoğunluğu
J_{SC}	Kısa Devre Akımı
$J-V$	Akım Yoğunluğu-Gerilim
k	Boltzmann Sabiti
K	Kelvin
K ⁺	Potasyum iyonu
KAl ₂ (Al ₂ Si ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Muskovit Mika
KMg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Floroflogopit Mika
M	Geçiş Metali
m	Metre
M	Mol
mg	Miligram
ml	Mililitre
mN	MiliNewton
MoS ₂	Molibden Disülfür

MoSe ₂	Molibden Diselenit
MO _u Cl _v	Metal Oksiklorürler
ms	Milisaniye
mTorr	MiliTorr
mW	Miliwatt
$n(x)$	Elektron Konsantrasyonu
N ₂	Azot Gazı
N _A	Alıcı Konsantrasyonu
nA	Nanoamper
NaCl	Sodyum Klorür
N _C	İletkenlik Bandı
N _D	Donör Konsantrasyonu
NH ₄ ReO ₄	Amonyum Perhanat
nm	Nanometre
N _V	Valans Bandı
O ₂	Oksijen Gazı
$p(x)$	Boşluk Konsantrasyonu
p-cSi	P-Tipi Kristal Silisyum
P_{in}	Gelen Işığın Gücü
P_{max}	Maksimum Güç
PSi	Gözenekli Silisyum
q	Elektron Yüğü
R	Fotoduyarlılık
Re	Renyum
Re ₂ O ₇	Renyum Heptaoksit
ReO ₂	Renyum Oksit
ReO ₃	Renyum Trioksit
ReS ₂	Renyum Disülfür
ReSe ₂	Renyum Diselenit
R _{net}	Net Rekombinasyon Oranı
s	Saniye
S	Sülfür
sccm	Dakika Başına Standart Santimetreküp
Se	Selenyum

Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Oksit
Sn	Kalay
T	Alttaş sıcaklığı
V	Gerilim
V_{OC}	Açık Devre Gerilimi
WS ₂	Tungsten DiSülfür
WSe ₂	Tungsten Diselenit
X	Kalkojen
ΔE_C	İletim Bandı Kayması
ΔE_V	Değerlik Bandı Kayması
ϵ	Dielektrik Sabiti
λ	Dalga Boyu
μ_n	Elektron Mobilitesi
μ_p	Boşluk Mobilitesi
χ_{ReS_2}	ReS ₂ 'nin Elektron İlgisi
χ_{ReSe_2}	ReSe ₂ 'nin Elektron İlgisi
Ψ	Elektrostatik Potansiyel

1. GİRİŞ

Fotodedektörler, optik bir sinyali elektrik sinyallerine dönüştüren optoelektronik aygıtlardır. Günümüze kadar pek çok fotodedektör çeşidi geliştirilmiştir. Örneğin, biyomedikal görüntüleme için X-ışını; litografi ve canlı hücre incelemesi için ultraviyole; görünür ışık haberleşmesi, dijital kamera ve video görüntüleme için görünür ışık; gece görüşü ve optik iletişim için yakın kızılötesi algılamadan yararlanılmaktadır. Silisyum fotodedektörlerin entegre edildiği tümleşik metal-oksit-yarıiletken (complementary metal–oxide–semiconductor, CMOS) teknolojisiyle yüksek performanslı dijital kameralar ve optik algılama sistemleri elde edilebilmektedir. Silisyum, düşük dielektrik sabiti nedeniyle düşük kapasitans ve hızlı çalışma gibi avantajlara sahiptir. Ancak, Silisyumun dolaylı bant aralığı, optik absorpsiyonunu, görünür ile optik iletişim ve gece görüş uygulamalarında kullanılan yakın kızılötesi bölgelerindeki dalga boyu kapsamını sınırlar. Civa Kadmiyum Tellür (HgCdTe) ve benzeri yapılardaki yarı iletken fotodedektörler ise görünür ile yakın kızılötesi bölgedeki dalga boylarını algılayabilmektedirler ancak imalatları karmaşıktır ve maliyeti arttıran teknikler ile üretilirler. Ayrıca, bu dedektörlerin CMOS teknolojilerine entegrasyonu da kafes uyumsuzluğu nedeniyle zordur. Bu yapıların diğer bir dezavantaj ise düşük gürültü ve yüksek hassasiyet elde etmek için kriyojenik çalışma sıcaklığına ihtiyaç duymalarıdır (Lee et al., 2001; Rogalski, 2005; Huo and Konstantatos, 2018). Fotodedektörlerin önemli uygulamalarından olan giyilebilir ve taşınabilir optoelektronik için CMOS uyumluluğu, düşük maliyetli üretim, şeffaflık ve esneklik benzeri özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, geleneksel yarı iletkenler bu beklentileri karşılayamamaktadır. Geleneksel külçe yarı iletkenler sert, kırılğan ve opaktırlar. Bu nedenle, külçe yarı iletkenlerin bükülebilir ve esnek optoelektronik uygulamaları ciddi derecede kısıtlanmaktadır. İki boyutlu (2B) malzemeler bükülebilir ve esnek olmalarının yanı sıra ayarlanabilir bant genişlikleri gibi özellikleri sayesinde optoelektronik uygulamalarda yüksek potansiyel sunmaktadır (Long et al., 2019).

Giyilebilir optoelektronikten faydalanan akıllı sensörler, direkt deriye temas ettirilerek kalp atış hızının ölçülmesinde, arteriyel kan akışının zamansal dinamiklerinin izlenmesinde ve doku oksijenasyonunun ölçülmesinde kullanılabilmektedir. Bu ölçümler, hem hasta takibinde hem de erken teşhiste önemli bir potansiyele sahiptir. Sensör tasarımında kullanılan fotodedektörler, hücrel dokulardan saçılan optik sinyalleri algılayıp sayısal verilerin elde edilmesini sağlar (Kim et al., 2016; Singh et al., 2019; Ku

et al., 2020). Yüksek hassasiyete ve yanıt hızına sahip fotodedektörler, sağlık alanında kullanılan yeni sensörlerin geliştirilmesinde faydalı olacaktır (Kang et al., 2018). Fotodedektörlerin ön plana çıktığı diğer bir kullanım alanı veri iletimi için optik sinyalleri kullanan görünür ışık haberleşme (Visible Light Communication, VLC) sistemleridir. Radyo dalgalarını kullanarak veri iletimi gerçekleştiren sistemler, radyo dalgaları ortam koşullarından etkilenip bozulduğu için veya kullanıldığı ortamlardaki cihazların çalışmasını etkilediği için hastanelerde, havacılıkta, sualtı araştırmalarında ve enerji santrallerinde kullanılamamaktadır. Bu alanlarda ışık doğası nedeniyle güvenli ve hızlı bir haberleşme alternatifi sunar. Ancak görünür ışık haberleşmesi tarihi çok eskilere dayanmasına rağmen alıcı ve verici olarak kullanılan cihazların kısıtlı kapasiteleri nedeniyle henüz yeterince yaygınlaşamamıştır. VLC sistemlerine entegre edilecek, yüksek hızlı algılama yapabilen ve yüksek ışık absorpsiyon kabiliyetine sahip fotodedektörler, bu teknolojinin gelişimine kuşkusuz ivme kazandıracaktır (Li et al., 2020).

Geniş bant aralığına sahip fotodedektörler, optik iletişim, görüntüleme, gece görüşü ve uzaktan algılama gibi optoelektronik uygulamalar için büyük potansiyele sahiptir. Ayrıca, polarizeli ışık kullanılarak daha fazla bilgi taşıma kapasitesi elde edilebilir. Bu nedenle, Van der Waals (vdW) yapısına dayalı geniş bant aralıklı polarizasyona duyarlı fotodetektörler, yeni nesil fotodedektörlerin tasarlanmasında önemli bir rol oynayacaktır (Li et al., 2020). Grafen'in keşfi ile ortaya çıkan 2B malzeme ailesi, geçiş metali dikalkojenitleri (transition metal dichalcogenides, TMDC'ler), altıgen Bor Nitrür (h-BN) ve Siyah Fosfor (BP) benzeri malzemelerle zamanla genişletilmiştir. Bu malzemeler Grafen'e kıyasla farklı elektronik ve optik özelliklerinden dolayı uygulamalarda farklı roller üstlenebilirler (Wang et al., 2019). Keşfedilen ilk iki boyutlu malzeme olan Grafen, görünür ışıktan terahertz frekansına kadar geniş bir algılama dalga boyu aralığına sahiptir. Boşluksuz (gapless) doğası nedeniyle absorpsiyon, yüksek karanlık akım nedeniyle duyarlılığı ve algılaması düşüktür (Long et al., 2016; Wang et al., 2021). Geçiş metali dikalkojenitler ise yüksek absorpsiyon, duyarlılık ve algılama yeteneği gösterirler. Bu nedenle, fotodedektörlerde Grafen/TMDC heteroeklem yapıların tercih edilmesinin cihaz performansını yükseltmesi beklenir (Wang et al., 2021). Grafen kullanılarak hızlı yanıt, uzun vadeli termal kararlılık ve geniş bant aralığında algılama gibi özellikler fotodedektörlere kazandırılabilir (Jo et al., 2018; Silva et al., 2021).

2B malzemelerin çoğu, farklı düzlem içi kristal yönleri boyunca benzer elektriksel ve optik özellikler sergileyen nispeten simetrik 2B kristal kafeslere sahiptir. 2014'te, düşük simetrikli kristal kafeslere sahip yeni bir 2B malzeme sınıfı ortaya çıkmıştır (Li et al., 2014; Tongay et al., 2014; Xia et al., 2014). Düşük simetrikli bu 2B malzeme sınıfı, BP, BP'nin arsenik alaşımları, Germanyum (Ge) ve Kalay (Sn) gibi grup IV elementlerinin monokalkojenitlerini içeren bileşikler ve geçiş metali dikalkojenit ailesinden Renyum Disülfür (ReS_2) ve Renyum Diselenit (ReSe_2) yapılarından oluşmaktadır (Tian et al., 2016a). Düşük kristal simetrikleri sebebiyle farklı düzlem içi kristal yönleri boyunca farklı elektriksel ve optik özellikler sergilerler (Tian et al., 2016b). Bu nedenle geleneksel izotropik 2B malzemelerin ötesinde yeni fotonik, elektronik ve optoelektronik cihazlar oluşturmak için ilgi çekici malzemelerdir (Li et al., 2020).

Popüler 2B malzeme sınıfı olan TMDC'lerin optoelektronik özellikleri, cihaz gereksinimlerine uyacak şekilde, katman sayısının değiştirilmesiyle ayarlayabilmektedir (Wang et al., 2012). Ancak, tabakaların optoelektronik özelliklerinin kalınlıkla değişmesi numune tekdüzeliği açısından zorluklara neden olabilmektedir. 2B ReX_2 ($\text{X} = \text{S}$ veya Se) bazlı malzemeler ile ilgili bazı çalışmalar, optoelektronik özelliklerinin katman sayısından bağımsız olduğunu göstermiştir. Toplu haldeki tabakalar bile, elektronik ve titreşimsel olarak ayrılmış tek tabaka gibi davranırlar. Bu özellik, bozuk 1T kafes yapısının sonucu olan zayıf vdW ara katman etkileşimlerine atfedilir (Yu et al., 2015; Jariwala et al., 2016). Bu nedenle, ReX_2 optoelektronik nano cihazlar ve 2B heteroyapıların üretimi ve tekdüzelik kontrolündeki zorlukların aşılması için mükemmel bir potansiyel sunar. ReX_2 , diğer düşük simetrikli malzemelerle karşılaştırıldığında mükemmel çevresel stabiliteye, alışılmadık yapısal özelliklere ve yapısal kararlılığa sahiptir. Ayrıca, ReX_2 'nin düşük kafes simetrisinden dolayı polarizasyona duyarlı fotoalgılama gerçekleştirebilir (Li et al., 2020). ReX_2 yapıları, görünür ve yakın kızılötesi aralığında yüksek ışık soğurma kabiliyeti, yapısal esnekliği, mükemmel çevresel stabilitesi ve kalınlıktan bağımsız bant aralığı nedeniyle yüksek performanslı fotodedektörler için ideal adaylardır.

1.1. Tezin Amacı

2B malzemeler ve bunların optoelektronik, fotonik uygulamalarının çoğu hassas üretim prosesleri ve kontrollü laboratuvar ortamına ihtiyaç duymaları nedeni ile henüz endüstriyellememiştir. Bu zorlukların aşılması, günümüz teknolojileri açısından kritik

öneme sahiptir ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle düşük simetrlili 2B malzemeler, görece yeni bir araştırma alanı olması sebebiyle keşfe açık pek çok özgün özelliğe sahiptir.

Grup-VII TMDC'lerinden olan Renyum DiSülfür (ReS_2), sıra dışı yapısal, elektriksel, optik ve kimyasal özellikleri ile dikkat çekmiştir. ReS_2 , düşük kristal simetrisi nedeniyle geleneksel simetrik 2B malzemelerin ötesinde yeni fotonik, elektronik ve optoelektronik cihaz uygulamaları için imkân sunar. ReS_2 , düşük simetrlili kristal yapısı sayesinde külçe haldeyken bile elektronik ve titreşimsel olarak ayrılmış tek katmanlar gibi davranır. Böylece diğer 2B malzemelerin aksine çeşitli özellikleri katmandan bağımsızdır (Jariwala et al., 2016). Kontrol edilebilen optik ve elektronik özelliklerinden dolayı özel ilgi gören MoS_2 , külçe halden tek tabakaya düşürülürken dolaylı bant aralığı yapısı direkt bant aralığı yapısına dönüşür. ReS_2 ise düşük simetrlili kristal yapısının bir sonucu olan kararlı 1T' kafes yapısı nedeniyle daima direkt bant aralıklı bir yarı iletken gibi davranır. Bu özelliği ile 2B malzemelerin katman kalınlığına bağımlılığı sorunu çözülmüş olacaktır. ReS_2 , çevresel olarak kararlı, kontrollü olarak büyük boyutlarda üretilebilir olması nedeniyle diğer düşük simetrlili malzemelere kıyasla da üstünlük sağlar (Li et al., 2020). Kısa bir sürede, geniş bant algılama, hassas algılama, zayıf ışık algılama, ultra hızlı algılama, polarizasyona duyarlı ışık algılama ve yüksek hızlı uzay iletişimi benzeri uygulamaları için yüzlerce ReS_2 tabanlı fotodedektör yapısı tasarlanıp bilim dünyasına sunulmuştur. Yapılan çalışmalarda ReS_2 'nin bu fotodedektörler için ideal malzeme olabileceği görülmüştür (Dastgeer et al., 2021; Wang et al., 2021). ReS_2 tabanlı fotodedektörler, geniş spektral aralıkta (ultraviyole, görünür ışık ve yakın kızılötesi, UV-VIS-NIR) duyarlılığa sahiptirler (Zhao et al., 2020; Elahi et al., 2020). Bu nedenle, kimyasal ve biyolojik algılama, duman ve yangın algılama, füze uyarı sistemleri, uzay iletişim sistemleri ve benzeri hem sivil hem de askeri uygulamalar için yüksek potansiyel taşırlar (Han et al., 2017). ReS_2 yüksek optik absorpsiyon ve geniş algılama bant aralığına sahiptir ancak uzun ömürlü tuzaklar nedeniyle yanıt hızı düşüktür. VdW etkileşimleriyle oluşturulan heteroeklemler, birden fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir aygıtta birleştirme olanağı sunar. Düşük simetrlili bir TMDC üyesi olan ReSe_2 , renyumun kimyasal doğası gereği pek çok özelliği bakımından ReS_2 'ye benzer; ancak ReS_2 'ye kıyasla daha düşük optik soğurma katsayısı nedeniyle optik uygulamalarda görece daha az tercih edilmiştir (Jo et al., 2018). Renyum tabanlı TMDC'ler genel olarak yüksek fotoduyarlılık sergilerken fotoyanıt hızları düşüktür. Ancak, ReS_2 ve ReSe_2 yapıları

birbiriyle karşılaştırıldığında, tuzak merkezleri gibi davranan Selenyum boşluklarının Sülfür boşluklarına göre daha kısa oluşma ve yeniden birleşme sürelerine sahip olması, ReSe₂ fotodedektörlerin ReS₂ tabanlı muadillerine göre daha hızlı tepki vermesini sağlar. Bu nedenle Selenit esaslı cihazlar, Sülfid esaslı cihazlara kıyasla daha hızlı fototepkilere ulaşabilmektedir (Jo et al., 2018).

Tez kapsamında ReS₂, ReSe₂ ve Grafen'in üstün özelliklerini birleştirmek amacıyla Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroyapıları tasarlanmış ve TMDC'ler arasında oluşan vdW heteroeklem yapısında katmanlar arası optik geçişe dayanan geniş frekans aralığında yüksek verimli optik algılama gözlemlenmiştir. ReSe₂, p-tip yarı iletken özelliği gösterirken ReS₂, n-tip yarı iletken özelliği gösterir. Bu nedenle, ReSe₂ ile ReS₂ arasında diyota benzer doğrultma davranışı gösteren tip II bant hizalamalı bir p-n eklem oluşur. Sonuç olarak, ReSe₂/ReS₂ yapısı ile tasarlanan dedektörler, tek başına ReSe₂ veya ReS₂ dedektörlere kıyasla daha yüksek duyarlılığa, daha yüksek tepki hızına ve geniş spektral algılama aralığına sahip yüksek optoelektronik performans sergilerler. Yapıdaki Grafen elektrot sayesinde algılama bant aralığını genişletme, yüksek taşıyıcı mobilitesi ve yüksek termal kararlılık özelliklerinden faydalanılmıştır. Bu avantajlar nedeniyle tez çalışması kapsamında öncelikle SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak p-cSi/ Gözenekli Silisyum (Porous Silicon-PSi)/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapıları simüle edilmiştir. Simüle edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı ile p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen yapısına kıyasla daha yüksek performans elde edildiği için Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı deneysel olarak üretilip karakterize edilmiştir. Ayrıca Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısına ek olarak Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısı deneysel olarak üretilip incelenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

2B malzemeler, Grafen'in keşfi ile ortaya çıkmış ve ilgi çekici optik, elektriksel ve mekanik özelliklerinden dolayı yoğun ilgi görmüşlerdir (Novoselov et al., 2004; Wang et al., 2019). 2B malzemelerin çoğu, farklı düzlem içi kristal yönleri boyunca benzer elektriksel ve optik özellikler sergileyen nispeten simetrik 2B kristal kafeslere sahiptir. 2014'te, düşük simetrikli kristal kafeslere sahip yeni bir 2B malzeme sınıfı ortaya çıkmıştır (Li et al., 2014; Tongay et al., 2014; Xia et al., 2014). Kristal yönleri boyunca farklı elektriksel ve optik özellikler sergiledikleri için, geleneksel izotropik 2B malzemelerin ötesinde yeni fotonik, elektronik ve optoelektronik cihazlar oluşturmak için ilgi çekici malzemelerdir (Li et al., 2020). Düşük simetrikli bu 2B malzeme sınıfı, siyah fosfor (BP),

BP'nin arsenikli alaşımları, germanyum (Ge) ve kalay (Sn) gibi grup IV elementlerinin monokalkojenitlerini içeren bileşikler ve TMDC ailesinden ReS_2 ve ReSe_2 oluşmaktadır (Tian et al., 2016a).

2B ReX_2 ($\text{X} = \text{S}$ veya Se) bazlı malzemelerle ilgili bazı çalışmalar, optoelektronik özelliklerinin katman sayısından bağımsız olduğunu göstermiştir. Yani, toplu haldeki tabakalar bile, elektronik ve titreşimsel olarak ayrılmış tek tabaka gibi davranırlar ve bu özellik, bozuk 1T kafes yapısına atfedilir (Yu et al., 2015; Jariwala et al., 2016). Bu nedenle, ReX_2 tabanlı optoelektronik nano cihazlar tekdüzelik kontrolündeki zorlukların aşılması için mükemmel bir potansiyel sunar. ReX_2 , diğer düşük simetrik malzemelerle karşılaştırıldığında mükemmel çevresel stabiliteye, alışılmadık yapısal özelliklere ve yapısal kararlılığa sahiptir. Ayrıca, büyük ölçekte ve kontrollü bir şekilde hazırlanabilirler ve ReX_2 düşük kafes simetrisinden dolayı polarizasyona duyarlı fotoalgılama gerçekleştirebilir (Li et al., 2020). ReX_2 , yüksek ışık soğurma kabiliyeti, yapısal esnekliği ve mükemmel çevresel stabilitesi nedeniyle yüksek performanslı fotodetektörler için ideal adaylardan biridir.

ReX_2 yapılarının optik, elektriksel, yapısal ve termal özellikleri büyük ölçüde boyutlarına, morfolojilerine ve kristal kalitelerine bağlıdır. Potansiyel uygulamalar için üretim yöntemlerinin optimizasyonları ile bu özellikler şekillendirilebilmektedir (Tian et al., 2016; Liu et al., 2020; Fadhel et al., 2021). Literatürde, ReX_2 yapıları hidrotermal yöntem, kimyasal buhar taşıma (Chemical vapor transport, CVT), fiziksel buhar biriktirme (physical vapor deposition, PVD), kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition, CVD), mekanik eksfoliasyon (mechanical exfoliation, ME) ve sıvı faz eksfoliasyon (liquid-phase exfoliation, LPE) ile sentezlenmiştir (Tian et al., 2016; Yu et al., 2019; Liu et al., 2020). Hidrotermal sentezde ve benzeri tekniklerde, ürünü kirletebilen reaktifler ve çözücüler kullanılmaktadır. Bu safsızlıklar yapıyı kusurlu hale getirmekte ve ortaya çıkan yapıların optik uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, çözelti içeren yöntemlerle hazırlanan ReX_2 yapıları enerji dönüşümü ve biyolojik uygulamalar için daha uygundur (Li et al., 2020). Hidrotermal yöntemlerle üretilen ReX_2 yapıları fotokatalizör veya elektrokatalizör olarak kullanılmaktadır (Yan et al., 2021; Pandey et al., 2023). CVT ile ise tek kristalli ReX_2 külçe yapıları üretilmektedir ve bu üretilen ReX_2 kristalleri mekanik eksfoliasyon ile 2B katmanlara ayrılabilir (Hafeez et al., 2017). Mekanik eksfoliasyon yöntemiyle elde edilen ReX_2 katmanları yüksek kristal kalitesine sahip olsalar da kalınlık, boyut ve pul şekli bakımında kontrol

edilmeleri zordur (Li et al., 2020). Mekanik eksfoliasyonun aksine, CVD yöntemi ile ölçeklenebilir, yüksek kaliteli ve tekrarlanabilir üretim gerçekleştirilebilir. CVD yöntemiyle, elde edilen ReX_2 pulunun kalınlığı, yanal boyutu veya morfolojisi öncül miktarı, öncül tipi, sıcaklık artış hızı, alttaş tipi, büyüme sıcaklığı ve büyüme süresine bağlıdır (Xiong et al., 2019). Bu nedenle CVD, 2B malzemelerin seri üretimi için en uygun yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Förster et al., 2017).

Son 11 yılda, Renyum tabanlı fotodedektörlerin araştırıldığı çok sayıda çalışma yapılmış ve Renyum tabanlı 2B fotodedektörlerin gelecek uygulamaları için umut vaat eden sonuçlar bildirilmiştir (Zhang et al., 2015; Shim et al., 2016; Zhu et al., 2019; Elahi et al., 2020; Kang et al., 2020; Afzal et al., 2021; Ahn et al., 2021; Tian and Liu, 2021; Wang et al., 2021; Zhong et al., 2021; Li et al., 2022; Jawa et al., 2023).

Fotodedektörlerin performansını değerlendirmek için fotoduyarlılık (responsivity, R), harici kuantum verimliliği (external quantum efficiency, EQE), algılama yeteneği (detectivity, D^*) ve tepki süreleri benzeri çeşitli ölçütler kullanılmaktadır. İlk kez 2015 yılında birkaç katman kalınlığında CVD ile üretilen 2B ReS_2 tabakalar kullanılarak bir fotodedektör üretilmiş ve 633 nm dalga boyunda ışık ile uyartılan dedektörün 16,14 A/W duyarlılık ile %3168 EQE sergilediği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ReS_2 'nin optoelektronik uygulamalar için umut vaat eden bir malzeme olduğunu göstermektedir (Zhang et al., 2015). Bant aralığı daraldıkça termal uyarılmalar artmakta ve bu artış yüksek karanlık akıma neden olmaktadır (Rogalski 2005; Rogalski et al., 2021). Bu nedenle, yüksek duyarlılıkla NIR bölgesinde algılama yapabilen fotodedektör tasarlamak literatürde bir problem olarak görülmektedir. ReSe_2 'nin, dar bant yapısı sayesinde NIR bölgesinde algılama yapılabilmesi beklenmektedir. 2016 yılında CVD ile büyütülmüş tek katmanlı ReSe_2 pul kullanarak tasarlanan ilk fotodedektör 850 nm ve 940 nm dalga boylarında 8,4 ve 5,1 A/W yüksek duyarlılık göstermiştir (Cui et al., 2017). ReSe_2 'nin yüksek kuantum verimliliği ve düşük yüzey kusurlarının bir sonucu olan düşük karanlık akımı sayesinde yüksek duyarlılık elde edildiği düşünülmektedir (Li et al., 2020).

ReX_2 yapılarının ışığı soğurma kabiliyeti yüksektir ve geniş bir spektral aralıkta algılama yapabilmektedir. Ancak, tek başına ReSe_2 veya ReS_2 kullanılan dedektörlerin yanıt süreleri uzundur. 2B malzemeler, kafes uyumsuzluğu sorunu olmadan üst üste istiflenerek vdW heteroeklem yapıları üretilmektedir ve üretilen bu vdW heteroyapılar iki malzemenin avantajlarını bir araya getirmekle kalmayıp, cihaz performansı için faydalı ışık-madde etkileşimleri oluşturmaktadır (Liang et al., 2020; Li et al., 2022; Zhang et al.,

2023). VdW heteroyapılar sayesinde, ReX_2 ile farklı 2B malzemelerin avantajlarını birleştirerek fotodedektörlerin genel performansını geliştirmek mümkündür. ReX_2 malzemelerinin yanıt hızını arttırmak, spektral duyarlılık, algılama yeteneğini arttırmak ve EQE değerlerini iyileştirmek için çeşitli heteroeklem yapıları oluşturulmuştur.

Bu heteroyapılardan biri ReS_2 fotodedektörün yanıt hızını arttırmak amacıyla oluşturulan ReS_2 /Grafen heteroeklemidir. ReS_2 /Grafen fotodedektör için 550 nm ışık altında duyarlılık, EQE ve D^* değerleri sırasıyla 7×10^5 A/W, $1,7 \times 10^8$ ve $1,9 \times 10^{13}$ Jones olarak bildirilmiştir. Ayrıca yanıt hızı 30 ms olarak ölçülmüştür ve algılanan spektral aralığın da genişlediği aktarılmıştır (Kang et al., 2018). Sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda ise ReSe_2 fotodedektör yapılarına Grafen elektrotlar eklenerek Grafen ve ReSe_2 'nin avantajlarını birleştirilmiştir. Tasarlanan Grafen/ ReSe_2 dedektör için 530 nm'de $4,7 \times 10^2$ A/W duyarlılık ve %1090 EQE, 790 nm'de ise $3,3 \times 10^2$ A/W duyarlılık ve %518 EQE değerleri elde edilmiştir. Ancak cihazın yanıt hızı beklenen şekilde arttırılamamış ve 0,5 s civarında ölçülmüştür (Silva et al., 2021). Elahi et al., (2020) ise iki Grafen elektrot arasına ReSe_2 pulu yerleştirerek sandviç biçiminde bir cihaz mimarisi oluşturmuşlardır. Tasarlanan dedektör ile 220-1064 nm aralığında geniş bir spektumda 2×10^6 - $1,5 \times 10^7$ A/W aralığında duyarlılık değerleri elde ettiklerini bildirmişlerdir. Dedektörün yanıt süresi ise tüm dalga boylarında saniyeler mertebesinde ve NIR'de UV'ye kıyasla daha hızlı yanıtlar gözlemlenmiştir (Elahi et al., 2020).

Ayrıca, n-tipi ve p-tipi yarı iletken özelliği gösteren ReS_2 ve ReSe_2 kullanılarak tip II bant hizalamasına sahip p-n eklemli fotodedektörler üretilmiştir (Cho et al., 2017; Jo et al., 2018; Li et al., 2021; Li et al., 2022). Üretilen $\text{ReSe}_2/\text{ReS}_2$ heteroeklem fotodedektör sayesinde geniş dalga boyu aralığında (405-980 nm) hızlı yanıtlar (0,29-1,5 ms) gözlemlenmiştir (Jo et al., 2018). 2024 yılında ise Tungsten Disülfür (WS_2)/ ReSe_2 vdW heteroeklem tasarlanmıştır. WS_2 ve ReSe_2 arasında da tip II bant hizalaması oluşmuş ve bu bant hizalaması sayesinde 350 nm dalga boyunda harici güç kaynağı kullanılmadan (self-driven mode) 2,78 mA/W duyarlılık, $1,05 \times 10^{10}$ Jones algılama ve 4/5 μs yanıt süreleri elde edilmiştir. Sunulan sonuçlar, düşük güç tüketimli optoelektronik cihazlar için umut vaat etmektedir (Du et al., 2024). 2025 yılında yapılan bir çalışmada ise Tungsten Diselenit (WSe_2) ve ReS_2 arasında oluşturulan heteroeklem araştırılmış ve tasarlanan fotodedektör yapısının sadece oda sıcaklığında değil, yüksek sıcaklık koşullarında da (473 K) yüksek hassasiyetli hızlı yanıtlar verebildiği aktarılmıştır (Liao et al., 2025).

ReS₂ ile üretilen alan etkili transistör (field effect transistor, FET) tabanlı fotodedektörler ise tuzak seviyeleri nedeniyle yüksek karanlık akım ve yavaş yanıt süresi sergilemektedirler. ReS₂ tabanlı yapılardaki bu zorlukları aşmak amacıyla h-BN ve Grafen kullanılarak Grafen/h-BN/ReS₂ heteroeklem FET tipi fotodedektör üretilmiş ve karakterize edilmiştir. h-BN, karanlık akımı bastırmış ve güçlü elektrik alan oluşturarak fotojenere taşıyıcıların hızlı tünellemesini sağlamıştır. Böylece hızlı (~70 µs), yüksek sinyal gürültü oranına sahip (~10³) ve polarizasyona duyarlı bir FET tabanlı fotodedektör yapısı elde edilmiştir (Zhou et al., 2025). Başka bir çalışmada ise ReS₂ tabanlı yapıların karanlık akım ve yavaş yanıt problemleri ReS₂/Molibden Diselenit (MoSe₂) heteroeklemi ile aşılmaya çalışılmıştır. Üretilen ReS₂/MoSe₂ heteroeklem fotodedektör sayesinde polarizasyon açısı ve Morse kodu birleştirilerek şifreli veri iletimi de gerçekleştirilmiştir. Böylece, ReX₂ tabanlı polarizasyona duyarlı fotodedektörlerin güvenli optik haberleşme alanında kullanılabileceği gösterilmiştir (Pan et al., 2024; Wang et al., 2025).

Bilindiği üzere Silisyum, yarı iletken endüstrisinin temel taşı konumundadır ve CMOS teknolojileriyle tamamen uyumludur. ReX₂ yapılarının Si tabanlı elektronik ve fotonik devrelere kolayca entegre edilebilir olmaları için ReS₂/Si heteroeklem yapılı fotodedektör üretilmiştir. Üretilen dedektör yapısı sayesinde ReS₂'nin güçlü ışık soğurma kabiliyeti ile Si'un yüksek taşıyıcı hareketliliği, düşük maliyeti ve endüstriyel uyumu birleştirilmiştir (Intonti et al., 2024). Aynı yıl ReSe₂/Si heteroeklem yapılı fotodedektör de üretilmiş ve karakterize edilmiştir (Jo et al., 2024). ReSe₂/Si cihazının geniş bant aralığında (405-1100nm) yüksek duyarlılık (465 A/W) ve algılama (4,8 × 10¹³ Jones) gösterdiği aktarılırken ReS₂/Si cihazı hızlı tepki süresi (300 µs) ve düşük karanlık akımı (~4,1 nA) ile öne çıkarılmıştır (Intonti et al., 2024; Jo et al., 2024).

1.3. Tezin Literatüre Katkıları

Grafen ve ReSe₂/ReS₂ p-n yapısının birleştirilmesi sayesinde, literatürdeki dedektörlerin zayıf yönleri iyileştirilerek literatüre katkı sağlanmıştır. ReSe₂ ve ReS₂ arasında oluşan tip II bant hizalamasına sahip p-n eklem cihaz performansını arttırdığı düşünülmektedir. Kullanılan 2B ReSe₂ ve ReS₂ yapıları CVD metodu ile üretilmiştir. CVD metodu, cihaz uygulamaları için ölçeklenebilir, yüksek kaliteli ReX₂ üretim imkanı sunduğu için tercih edilmiştir (Li et al., 2020). Bu tez çalışması sonucunda literatüre kazandırılan katkılar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 2B malzemelerin kullanıldığı optoelektronik aygıt uygulamalarında çoğunlukla, rastgele boyutlarda pulların üretildiği mekanik eksfoliasyon yöntemi tercih edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise CVD tekniği kullanılarak cihaz tasarımına uygun ReSe₂ ve ReS₂ pulları üretilmiş ve cihaz fabrikasyonu için kullanılmıştır.
- İlk kez Grafen elektrotlar ve ReSe₂/ReS₂ p-n eklemi birlikte kullanılarak Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen ve üst kontağın metal olan Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektörler üretilmiştir. Üretilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör sayesinde, ReS₂ ve ReSe₂ yapılarının algılayamadığı dalga boyları, Grafen tabakası tarafından algılanmıştır. Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör yapısındaki tabakaların optik bant aralığı enerjileri üstten alta doğru kademeli olarak azalmaktadır. Bu bant aralığı gradyanı, fototaşıyıcıların ayırımı ve taşınımını kolaylaştırmaktadır.
- Üretilen fotodedektör, literatürdeki benzer fotodedektörlere nazaran daha geniş dalga boyu aralığında algılama yapabilmektedir. Geniş spektral aralıkta algılama yapabilen fotodedektörler kuantum haberleşme, otonom araçlar, akıllı tarım, gece görüş sistemleri, uzay ve uydu tabanlı algılama gibi ileri teknolojik alanlarda kullanıldığı için önemlidir.
- SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak ilk kez p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroyapıları modellenmiştir.

1.4. Tezin Akışı

Bu tez, beş ana bölümden oluşan bir akış takip edilerek oluşturulmuştur. “**Giriş**” bölümünde, 2B malzemelere dayalı fotodedektörlerin bilimsel ve teknolojik önemine değinilmiştir. Bu kapsamda, Grafen, ReSe₂ ve ReS₂ gibi 2B malzemelerin temel özellikleri ve literatürdeki konumları tartışılmış. Ayrıca çalışmanın amacı, kapsamı ve literatüre sunmayı hedeflediği katkılar ortaya konmuştur.

“**Materyal ve Yöntem**” bölümünde ise deneysel süreçte kullanılan malzemeler, bu malzemelerin üretimi, cihaz fabrikasyonu ve karakterizasyon yöntemleri detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, 2B malzeme tabanlı aygıtların modellenmesi için kullanılan yazılım paketleri anlatılmıştır.

“**Araştırma Bulguları ve Tartışma**” bölümünde, malzemelerin üretim süreçleri, karakterizasyon sonuçları, fotodedektör fabrikasyonu anlatılmış ve fotodedektöre ait

performans ölçümleri sunulmuştur. Ayrıca, SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak modellenen cihaz ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Beşinci bölüm olan “**Sonuç ve Öneriler**” bölümünde ise tez çalışması kapsamında elde edilen genel sonuçlar özetlenmiş, çalışmanın literatüre ve uygulama alanlarına olası katkıları vurgulanmıştır. Ayrıca, görünür ve yakın kızılötesi dalga boyu aralığında algılama yapabilen 2B yapılı fotodetektörlerin performanslarının iyileştirilmesine ve benzer yapıların geliştirilmesine yönelik gelecekte yapılabilecek çalışmalara dair öneriler sunulmuştur.

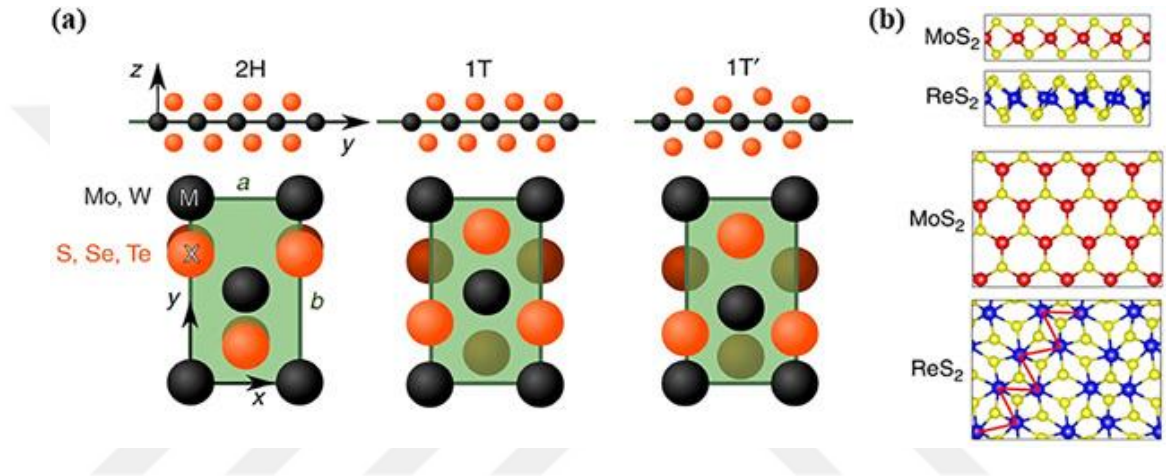


2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. 2B ReS₂ ve ReSe₂ Yapılarının Özellikleri

2.1.1. Kristal Yapı

Genel olarak, TMDC'ler Grafen gibi hegzagonal kristal yapıya sahiptir. Bu yapılar, metal atomlarının iki kalkojen tabakası arasında yer aldığı Şekil 1 (a)'daki gibi bir sandviç yapı biçiminde tanımlanabilmektedir. Bu durum, TMDC'lerin genel kimyasal formülü olan MX₂ ifadesini açıklamaktadır (Duerloo et al., 2014).

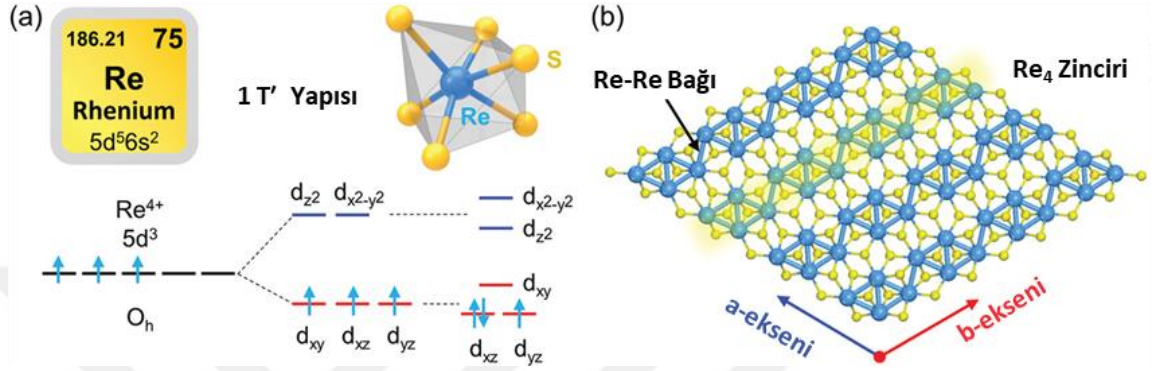


Şekil 1. (a) TMDC'lerde yaygın olarak görülen üç kristal fazı: 2H, 1T ve 1T'. Her bir faz, kafes sabitleri a ve b ile tanımlanan dikdörtgen bir birim hücre ile ifade edilebilir.

Burada M bir geçiş metali atomunu, X ise bir kalkojen atomunu temsil etmektedir (Duerloo et al., 2014). (b) ReS₂'nin bozulmuş 1T yapısının, 1H yapısına sahip MoS₂ ile karşılaştırmalı olarak yan (üst iki panel) ve üstten görünümü (alt iki panel) (Tongay et al., 2014).

Grup VI TMDC'lerde farklı metal koordinasyonları ve çok katmanlı yığın dizilimleri nedeniyle yapısal faz varyasyonları gözlemlenmektedir (Duerloo et al., 2014). Oktahedral ve trigonal prizmatik olmak üzere iki metal koordinasyon fazı vardır ve bunlar sırasıyla 2H ve 1T olarak adlandırılır. Ancak, ReS₂'nin tek katmanlı yapısı, MoS₂ gibi geleneksel 1H yapısındaki TMDC'lerden oldukça farklıdır. ReX₂, asimetrik yapısal bozulmaya (distorsiyon) uğramış, 1T yapısı olarak değerlendirilebilecek, özgün bir 1T' kristal yapısına sahiptir (Duerloo et al., 2014; Xiong et al., 2019). Şekil 1 (b)'de ReS₂'nin bozulmuş 1T kristal yapısının yandan ve üstten görünümü verilmiştir.

1925 yılında keşfedilen renyum, periyodik tablonun son kararlı elementi olarak kabul edilmektedir ve yerkabuğundaki en nadir elementlerden biridir (Xiong et al., 2019; Li et al., 2020). Külçe ReS_2 , Grafen ve diğer TMDC'ler gibi her bir katmanı zayıf vdW kuvvetleriyle bir arada tutulan tabakalı bir kristal yapıya sahiptir. ReX_2 kristalindeki Re atomunun değerlik elektronlarının dizilimi ve atomik yapısı Şekil 2 (a)'da sunulmuştur (Li et al., 2020).



Şekil 2. (a) 1T' fazındaki ReS_2 kristalinde Re atomunun değerlik elektronlarının dizilimi. (b) Tek tabakalı ReX_2 'nin atomik yapısı (Li et al., 2020).

Her bir Re atomu yedi değerlik elektronuna sahiptir ve bu elektronlardan biri bağ yapmamış elektron konumundadır. Re atomundaki fazla değerlik elektronu sebebiyle ReX_2 kristalinde hem metal-kalkojen hem de metal-metal bağları bulunmaktadır. Özellikle metal-metal bağlarının varlığı, ReX_2 'nin birim hücre yapısını iki katına çıkarır. Bu durum, bir birim ReX_2 yapısında dört renyum ve sekiz kalkojen (Sülfür (S), Selenyum (Se)) atomu bulunduğu anlamına gelmektedir (Xiong et al., 2019; Satheesh et al., 2023).

Her bir ReX_2 katmanı Şekil 2 (b)'deki gibi tek boyutlu ve birbirine paralel hizalanmış Re_4 kümelerinden oluşan zincirleri içeren bir tek katman (monolayer) yapıya sahiptir. Re-Re bağları, Re zincirlerinden oluşan bir süperörgü yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Katman düzleminde, bükülmüş kalkojen katmanları ve zigzag biçimindeki Re zincirleri, kafes vektörlerinden biri boyunca gözlemlenebilir. Bu yapı, Peierls bozulmasının bir sonucu olup, hegzagonal simetrinin kırılmasına yol açmaktadır (Tongay et al., 2014). Dolayısıyla, ReX_2 kristali oktahedral 1T fazının simetrisinden türeyen bir Peierls bozulması sergilemektedir (Xiong et al., 2019; Satheesh et al., 2023).

Her bir katmanda Re zincirlerinin bulunması nedeniyle, katmanlar arası enerji farkı oldukça düşüktür. Bu durum, ReX_2 kristallerinde katmanların düzensiz istiflenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, Re atomlarındaki fazla bir adet elektron, katman

içindeki kutuplaşmayı önemli ölçüde azaltmaktadır ve bu da katmanlar arası vdW etkileşimlerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Yani, ReX_2 katmanları arasındaki bağlanmanın zayıf olmasının temel nedenleri, hem katmanlar arası istiflenme düzeninin olmaması hem de katman içi kutuplaşmanın zayıf olmasıdır. Düşük kafes simetrisine sahip olan ReX_2 , bu zayıf katmanlar arası etkileşim sayesinde önemli ölçüde anizotropik özellikler sergilemektedir. Özellikle tek katmanlı ReS_2 , düzlem içi yönlerde belirgin farklılık gösteren kuantum sınırlama (quantum confinement) etkileriyle yüksek derecede anizotropi sunar. Literatürde incelenen tüm TMDC'ler arasında, iki eksen boyunca en yüksek anizotropik hareketlilik oranına sahip olan malzeme ReS_2 'dir. Ayrıca, NIR frekanslarında anizotropik optik özellikler de sergilemektedir (Tongay et al., 2014; Xiong et al., 2019).

ReX_2 yapılarının elementel bileşimini, bağ yapısını ve oksidasyon durumunu belirlemek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) kullanılmaktadır (Yao et al., 2019; Pandey et al., 2023; Sun et al., 2023).

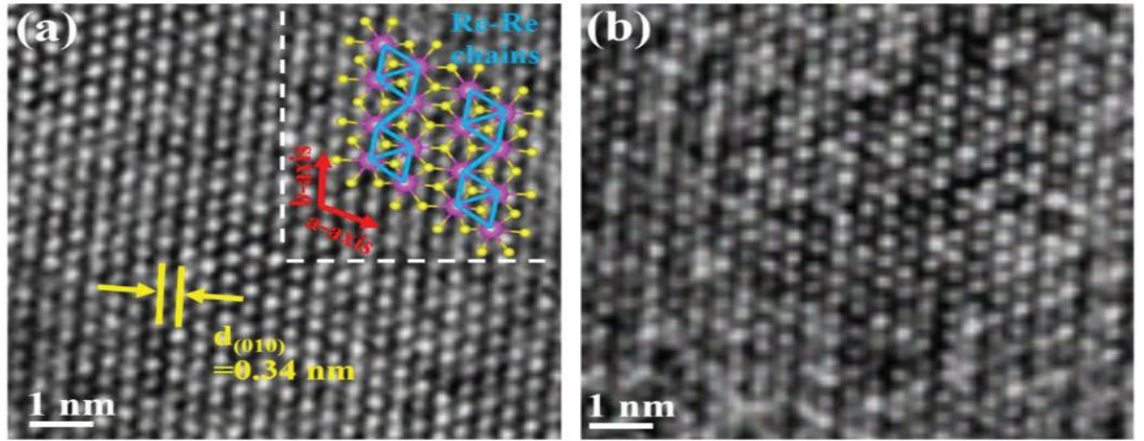
Literatürde CVD ile büyütülen ReS_2 filmleri EDS kullanılarak analiz edilmiş ve Re-S sinyallerinin oranının %32,41 ve %67,59 olduğu aktarılmıştır. Bu oran yaklaşık 1:2 stokiometrisine uymaktadır (Sun et al., 2023). Aynı şekilde ReSe_2 filmleri için yapılan EDS analizinde de Re ve Se elementlerinin homojen dağıldığı ve Re:Se oranının 1:2 olduğu görülmüştür (Yao et al., 2019).

Ayrıca, XPS ile ReS_2 ve ReSe_2 'de Re atomlarının 4f seviyelerinden yayılan karakteristik fotoelektron pikleri ve kalkojenlerin p veya d seviyelerinden gelen pikler analiz edilebilmektedir. ReS_2 kristalleri için Re $4f_{7/2}$ ve $4f_{5/2}$ çekirdek seviyeleri $\sim 42,5$ eV ve $44,9$ eV'de gözlenmekte; bu iki pik arasındaki $\sim 2,4$ eV'lik ayrım Re-S bağ oluşumundan kaynaklanmaktadır. S $2p_{3/2}$ ve $2p_{1/2}$ piki ise $\sim 162,9$ eV ve $164,1$ eV'de bulunmaktadır. Bu bağ enerjileri, ReS_2 'deki Re^{4+} oksidasyon durumunu ve Sülfür atomlarının 2p yörüngelerini doğrulamaktadır (Kim et al., 2017). ReSe_2 filmleri için Re $4f_{7/2}$ ve $4f_{5/2}$ pikleri $\sim 42,2$ eV ve $44,7$ eV civarında bulunmakta, Se $3d_{5/2}$ ve $3d_{3/2}$ pikleri ise $\sim 53,5$ eV ve $54,6$ eV'de yer almaktadır. Bu değerler Re-Se bağlarının varlığını ve Re atomlarının yüksek oksidasyon durumunu doğrulamaktadır (Pandey et al., 2023).

ReX_2 yapılarının kalınlığı, yüzey morfolojisi ve yapısal anizotropi ise atomik kuvvet mikroskobu (AFM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron

mikroskobu (TEM) kullanılarak incelenmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda tek tabakalı ReS₂ pullarının ~0.7 nm ve ReSe₂ pullarının ise ~0.75 nm kalınlıkta olduğu aktarılmıştır (Li vd, 2016; Cui et al., 2016; Cui et al., 2017; Jo et al., 2018; Varghese et al., 2020; Jiang et al., 2020).

ReX₂ yapılarının film sürekliliğini ve heteroyapı arayüzlerini değerlendirmek için ise SEM kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda heteroyapıların yüzeyinin düzgün, temiz ve homojen olduğu SEM ile gösterilmiştir (Nazirt et al., 2022). ReS₂ ve ReSe₂ filmlerinde yüksek çözünürlüklü TEM (HRTEM), kafes dizilimini ve kusurları incelemek için kullanılmıştır. TEM, örnekten geçen elektronların kırınımı ve görüntülenmesiyle atomik düzeni ortaya çıkarmaktadır. HRTEM ile ReX₂ yapılarının 1 T' fazının kafes çizgileri ve rastgele yönelmiş anizotropik büyüme Şekil 3'teki gibi görüntülenebilmektedir (Huang et al., 2019; Li et al., 2019; Chen et al., 2021).



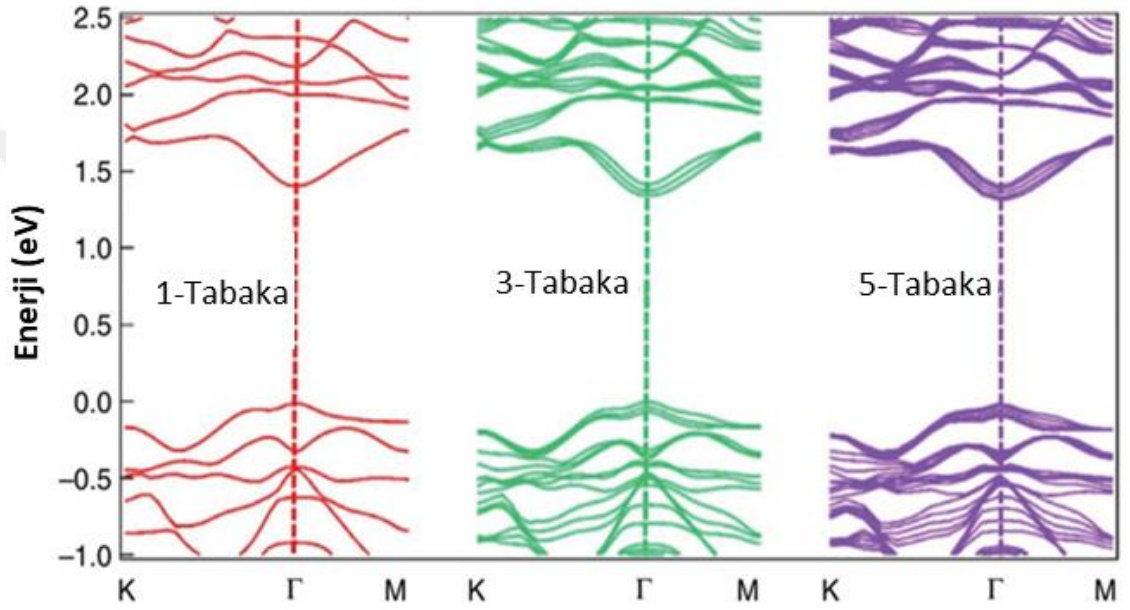
Şekil 3. (a) [001] görüntüleme yönüne sahip bozulmamış ReS₂ nanosyapıların ve (b) 10 saniye Ar iyon demeti bombardımanına maruz kalmış ReS₂ nanosyapıların HRTEM görüntüleri (Huang et al., 2019).

2.1.2. Elektronik Bant Yapısı

ReX₂ bileşiklerinde valans bandı ve iletkenlik bandı kenarları, sırasıyla Re atomlarının d-orbitalleri ve X (kalkojen) atomlarının p-orbitalleri tarafından belirlenmektedir. Yoğunluk fonksiyonel teorisi (Density functional theory, DFT) hesaplamaları, ReX₂ tabakalarının kalınlığı külçe halden tek katmana indirildiğinde yalnızca küçük bir bant aralığı genişlemesi dışında neredeyse aynı elektronik bant yapısının korunduğunu göstermiştir (Tongay et al., 2014; Li et al., 2020). ReX₂'nin bu davranışı, bozulmuş 1T kristal yapısına bağlı olarak katmanlar arası etkileşimin zayıf

olması ile açıklanmaktadır. Bu zayıf etkileşim, bant yeniden normalleşmesinin gerçekleşmemesine ve böylece toplu ReX_2 'nin elektronik ve titreşimsel olarak birbirinden ayırık tabakalar gibi davranmasına neden olmaktadır (Tongay et al., 2014; Satheesh et al., 2023).

ReS_2 'nin bant aralığı değerleri DFT ile külçe yapı için 1,35 eV, üç tabakalı yapı için 1,40 eV ve tek tabakalı yapı için 1,44 eV olarak hesaplanmıştır (Liu et al., 2015). DFT ile hesaplanan tek tabakalı, üç tabakalı ve beş tabakalı ReS_2 için elektronik bant yapısı Şekil 4'te sunulmuştur (Liu et al., 2015).

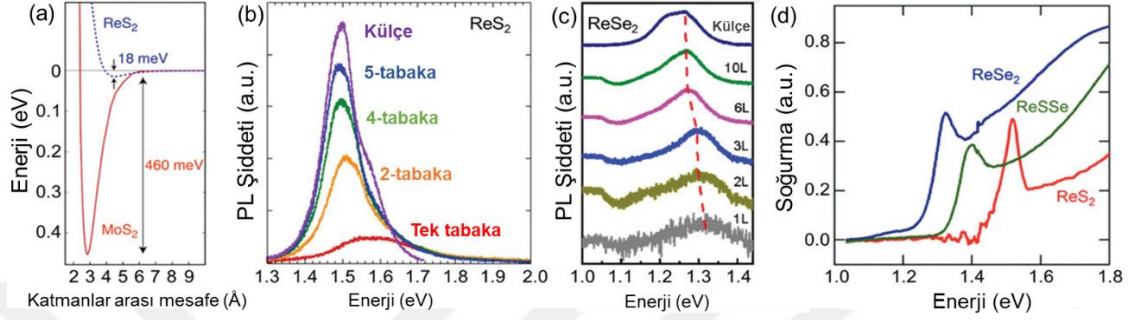


Şekil 4. ReS_2 'nin DFT ile hesaplanan tek tabakalı, üç tabakalı ve beş tabakalı elektronik bant yapısı (Liu et al., 2015).

Deneysel çalışmalarda ReS_2 yapılarının kalınlığı külçeden tek tabakaya inerken bant aralığı değerinin 1,5'ten 1,7'ye kaydığı aktarılmıştır (Li et al., 2016; Sun et al., 2023). Ayrıca, farklı kalınlıklardaki tüm ReS_2 yapıları doğrudan bant aralıklı (direct bandgap) yarı iletken özelliği sergilemektedir (Splendiani et al., 2010). ReSe_2 için yapılan DFT hesaplamaları ise külçe ReSe_2 'nin 1,09-1,31 eV aralığında doğrudan bant aralıklı bir yarı iletken gibi davrandığını, buna karşın tek katmanlı ReSe_2 'nin dolaylı bant aralığına (1,34 eV) sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak literatürde bu durumun tersini rapor eden çalışmalar da bulunmaktadır (Marzik et al., 1984; Cui et al., 2017; Li et al., 2020). Ayrıca deneysel çalışmalarda ReSe_2 'nin bant aralığı külçe yapıları için 1,29 eV, tek tabakalı yapılar için ise 1,3 eV ölçülmüştür (Cui et al., 2017).

2.1.3. Optik Özellikler

DFT ile ReS_2 'nin katmanlar arası bağlanma enerjisi birim hücre başına yaklaşık 18 meV olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, MoS_2 için bu değer Şekil 5 (a)'da görüldüğü üzere yaklaşık 460 meV'dir (Tongay et al., 2014). Bu sonuç, ReS_2 'nin katmanlar arası etkileşiminin MoS_2 'ye kıyasla çok daha zayıf olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 5. (a) Katmanlar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak sistemin hesaplanan toplam enerjisi. ReS_2 'deki enerji eğrisi minimumunun daha sık olması ReS_2 'nin MoS_2 'ye kıyasla çok daha zayıf katmanlar arası bağlanma enerjisi olduğunu ifade etmektedir. (b) Farklı katman sayısına sahip ReS_2 'nin PL spektrumu (Tongay et al., 2014). (c) Farklı katman sayısına sahip ReSe_2 'nin PL spektrumu (Zhao et al., 2015). (d) ReS_2 , ReSSe alaşımı ve ReSe_2 'nin soğurma spektrumu (Liu et al., 2016).

ReS_2 'nin, diğer 2B malzemelere kıyasla bu denli zayıf katmanlar arası etkileşimi; kalınlığa bağlı Raman ve Fotoluminesans (photoluminescence, PL) spektrumları ve sıcaklığa bağlı Raman spektrumları gibi deneysel yöntemlerle de doğrulanmaktadır (Li et al., 2020). Şekil 5 (b) ve (c)'den görüldüğü üzere, ReX_2 malzemelerinin PL spektrumları, katman sayısına bağlı önemli bir değişim göstermemektedir. ReS_2 ve ReSe_2 'nin kalınlığı külçe yapıdan tek tabakalı yapıya inceldikçe, PL yoğunluğu azalmaktadır; ancak pik konumunda yalnızca ihmal edilebilir düzeyde maviye kayma gözlemlenmektedir (Zhao et al., 2015). Bu sonuçlar, pulun inceltilmesinin elektronların kuantum sınırlamasını artırmadığını ve komşu katmanların elektronik olarak büyük ölçüde ayrık olduğunu göstermektedir.

Optik soğurma spektrumlarında, hem külçe hem de tek tabakalı ReS_2 için üç optik geçiş tanımlanmıştır. Bu durum, ReS_2 'nin eksitonik ve emisyon özelliklerinin birbirinden ayrık olduğunu göstermektedir (Aslan et al., 2015). Ayrıca, ReS_2 (1,51 eV) ve ReSe_2 (1,32 eV) malzemelerinin eksiton pikleri, PL spektrumlarından elde edilen bant aralığı

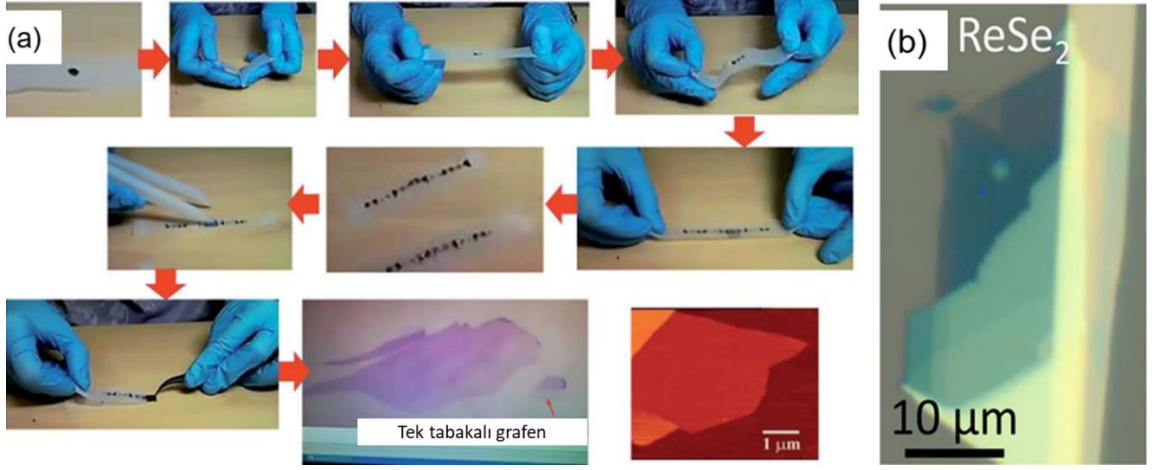
değerleriyle uyushmaktadır. Şekil 5 (d)'de sunulan ReSSe alaşımının 1,39 eV'da konumlanan eksiton zirvesi ise bu alaşımlarda enerji bant mühendisliğinin etkili bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir.

Katmanlı ReS₂ ve ReSe₂ yapıları düşük simetrisi nedeniyle 100-400 cm⁻¹ aralığında çok sayıda Raman pikine sahiptir (Li et al., 2020). ReS₂, 132 cm⁻¹ ve 139 cm⁻¹ konumlu tepe noktası düzlem dışı A_g moduna diğer modlar ise düzlem içi E_g moda karşılık gelmektedir. Ayrıca, Raman modlarının keskinliği iyi bir kristal kalitesinin göstergesidir (Li et al., 2016; Chen et al., 2018; Lim et al., 2019). Yapısal olarak ReS₂ ile benzerlik gösteren ReSe₂'nin ise düzlem içi ve dışı titreşim modlarına karşılık gelen ~124 cm⁻¹ (E_g^{raman}) ve ~173 cm⁻¹ (A_g) konumlu iki tipik Raman tepe noktası vardır (Hafeez et al., 2016; Xie et al., 2019; Mathew et al., 2022).

2.2. 2B ReS₂ ve ReSe₂ Yapılarının Üretim Yöntemleri

ReX₂ yapılarının optik, elektriksel, yapısal ve termal özellikleri kristal kalitesine bağlıdır (Tian et al., 2016; Liu et al., 2020; Fadhel et al., 2021). Literatürde ReSe₂; hidrotermal yöntem, CVT, CVD, ME ve LPE yöntemleriyle üretilmiştir (Tian et al., 2016; Yu et al., 2019; Liu et al., 2020). Hidrotermal yöntemlerde çözücü ve reaktiflerden kaynaklanan safsızlıklar yapıyı kusurlu hale getirerek optik uygulamaları sınırlamaktadır; bu nedenle bu yapılar daha çok enerji dönüşümü ve biyomedikal alanlarda kullanılmaktadır (Li et al., 2020; Yan et al., 2021; Pandey et al., 2023). CVT yöntemi ise külçe malzemelerin sentezinde kullanılan bir üretim yöntemidir (Wang et al., 2019). CVT yöntemiyle üretilen külçe haldeki malzemeler, mekanik eksfoliasyon yöntemi ile 2B malzemelere dönüştürülebilmektedir (Tongay et al., 2014; Li et al., 2020). İlk 2B ReX₂ yapıları da bu yöntem kullanılarak hazırlanmıştır (Tongay et al., 2014; Wang et al., 2019).

İki boyutlu malzemelerin kullanıldığı optik uygulamalarda çoğunlukla, rastgele boyutlarda pulların üretildiği ME yöntemi tercih edilmektedir (Hafeez et al., 2017; Li et al., 2020). ME, yüksek kristal kalitesine sahip 2B yapıların sentezi için kullanılan basit bir tekniktir. ME'nin temel adımları ve ME ile elde edilen bira katmanlı bir ReSe₂ kristalinin optik mikroskop görüntüsü Şekil 6'da sunulmaktadır (Yi and Shen 2015; Lorchat et al., 2016).



Şekil 6. (a) Mekanik eksfoliasyonla 2B malzeme sentezi (Yi and Shen 2015). (b) Eksfole edilmiş birkaç katmanlı bir ReSe_2 kristalinin optik mikroskop görüntüsü (Lorchat et al., 2016).

Mekanik eksfoliasyonda, külçe haldeki malzeme endüstriyel şeffaf banda (selo bant veya nitto band) yapıştırılır ardından malzemenin diğer tarafına başka bir bant parçası yerleştirilir. İki bant parçasının birkaç kez soyulması ile elde edilen film, temiz ve düz bir altaşa aktarılır. Elde edilen film, tek katmanlı veya çok katmanlı formda olabilmektedir (Yi and Shen 2015; Liu et al. 2020; Li et al., 2020).

Mekanik eksfoliasyonla üretilen pullar yüksek kristal kalitesine sahiptir ve ME uygulaması kolay bir yöntemdir. Ancak, ME yöntemi ile tekrarlanabilir ve kontrollü bir üretim süreci oluşturmak zordur (Li et al., 2020). Buna karşılık CVD yöntemi, sentez parametrelerinin ayarlanmasıyla kontrollü, ölçeklenebilir, geniş yanal alanlı ve yüksek kaliteli üretim sunmaktadır (Xiong et al., 2019; Förster et al., 2017).

2.2.1. 2B ReS_2 ve ReSe_2 Yapılarının CVD Yöntemi ile Üretimi

CVD, geleneksel yarı iletken filmlerin üretilmesi için kullanılan aşağıdan yukarıya yaklaşımlardan biridir ve 2B malzemeleri büyütmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. CVD prosesi, öncüler arasındaki kimyasal reaksiyon vasıtasıyla elde edilen gaz fazından katı materyalin biriktirilmesini içermektedir. Bu süreçte büyüme sıcaklığı, gaz akış hızı, altaş tipi, öncül seçimi benzeri birçok parametrenin iyi kontrol edilmesi gerekir (Li et al., 2020). CVD yöntemi, yüksek kontrol edilebilirliği nedeniyle 2B malzemelerin seri üretimi için en uygun yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Förster et al., 2017). Ancak, ReX_2 yapılarının düşük simetrisinin bir sonucu olan

asimetrik ve düzlem dışı büyüme, bu yapıların CVD yöntemiyle kontrollü sentezlerini zorlaştırmaktadır. Daha önceki çalışmalarda ReX_2 pullarının kolaylıkla kalın, tekdüze olmayan, çiçek benzeri ve dendritik yapılara dönüştüğü bildirilmiştir.

ReX_2 yapılarının CVD metodu ile sentezinin araştırıldığı ilk çalışmalarında düşük maliyeti nedeniyle Renyum (Re) kaynağı olarak NH_4ReO_4 (Amonyum Perhanat) kullanılmıştır (He et al., 2015; Chen et al., 2018; Chen et al., 2021). Aynı yıllarda yapılan diğer çalışmalarda ise öncü olarak Re tozu kullanılmış ve Re öncüsü ile üretilen ReX_2 pullarının NH_4ReO_4 kullanılarak sentezlenen pullara kıyasla daha yüksek kristal kalitesine sahip olduğu bildirilmiştir. Ancak, Re'nin yüksek erime noktası (3180 °C) nedeniyle epitaksiyel büyüme verimliliği düşüktür (Cui et al., 2016; Chen et al., 2018). Yüksek erime noktası probleminin üstesinden gelmek için 850 °C ötektik noktaya sahip Re-Tellür ikili karışımı öncü olarak kullanılmış ve mika altlık üzerinde ~20 µm boyutunda pullar elde edilmiştir (Cui et al., 2016).

CVD çalışmalarında Renyum kaynağı olarak kullanılan diğer bir öncü toz ise Renyum Trioksit'dir (ReO_3). ReO_3 tozunun daha yüksek büyüme verimliliği, daha düşük büyüme sıcaklığı ve daha yüksek kristal kalitesi sayesinde Re ve NH_4ReO_4 'e kıyasla daha avantajlı olduğu bilinmektedir (Li et al., 2016; Cui et al., 2017; Jiang et al., 2018; Xie et al., 2019; He et al., 2022).

S'nin kimyasal reaktivitesi Se'den daha yüksektir. Bu nedenle ReS_2 yapılarının büyütülmesi ReSe_2 yapılarına kıyasla nispeten daha kolaydır ve CVD metodu ilk olarak ReS_2 yapıları için araştırılmıştır (He et al., 2015). Bu araştırmalarda edinilen deneyimler nedeniyle ReSe_2 'nin CVD büyütülmesini inceleyen çalışmaların neredeyse tamamında Renyum kaynağı olarak ReO_3 kullanılmıştır (Cui et al., 2017; Kang et al., 2017; Liu et al., 2018; Jiang et al., 2018; Jiang et al., 2020; Ge et al., 2022). ReO_3 kararsız olduğu için sıcaklık 400°C'ye yükseldiğinde Denklem 1'deki gibi hızla kolay süblimleşen Re_2O_7 (Renyum Heptaoksit) ve daha az uçucu olan ReO_2 'ye (Renyum Oksit) ayrışır. Daha sonra reaktif Re_2O_7 'in uygun sıcaklıkta S veya Se ile Denklem 2 ve 3'teki gibi tepkimeye girmesi sonucu sırasıyla ReS_2 ve ReSe_2 yapıları sentezlenebilmektedir (Li et al., 2016; Li et al., 2020; Mathew et al., 2022).



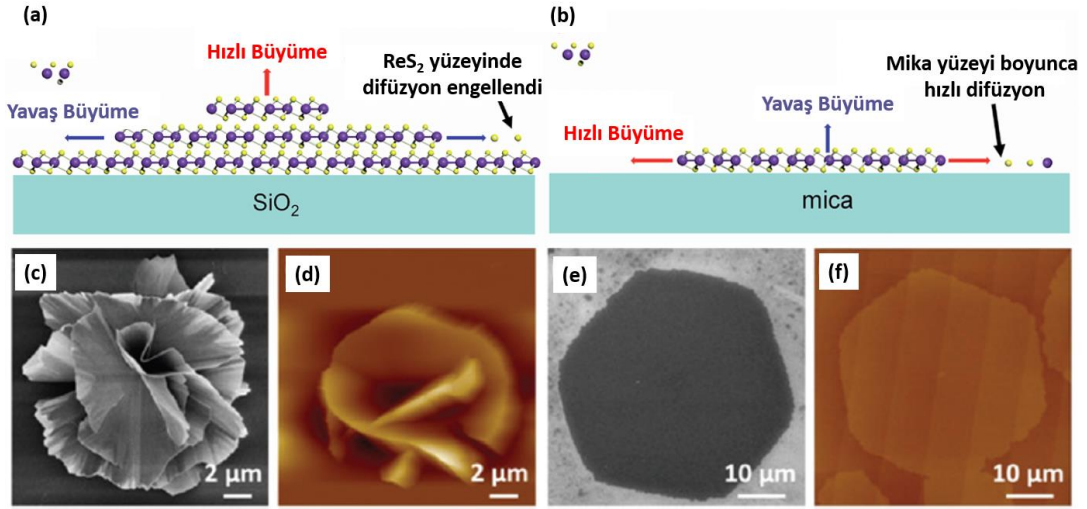


Uçucu Re_2O_7 , aşırı miktarda buhar ve çekirdeklenmeye neden olur (Li et al., 2016; Li et al., 2020). Bu aşırı çekirdeklenme kontrolsüz, anizotropik ve düzlem dışı büyümeye neden olur. Böylece kalın, dendritik veya çiçek benzeri yapılar elde edilir (Li et al., 2016; Cui et al., 2017). Büyüme sırasında çekirdeklenme yoğunluğunun azaltılmasıyla geniş alanlı TMDC'lerin sentezi mümkündür (Wang et al., 2020). Reaktanların (Renyum oksitleri ve S/Se) konsantrasyonunda ve akış hızında meydana gelen azalma çekirdeklenme yoğunluğu ve büyüme hızında azalmaya neden olmaktadır. Böylece, geniş alanlı, tekdüzeliği iyi ve kaliteli TMDC tabakalarının sentezine katkıda bulunan nispeten istikrarlı bir büyüme ortamı oluşturulmaktadır (Kang et al., 2020).

ReX_2 'de katmanlar arası bağlantı, diğer TMDC'lere kıyasla zayıftır ve bu zayıf katmanlar arası bağlantı, Frank-van der Merwe büyümesini (katman katman büyüme) çok daha kolay hale getirmektedir (Cui et al., 2016). CVD yönteminde, tek katmanlı ve yüksek kaliteli ReX_2 pullarının sentezlenmesi için uygun alttaş seçimi de önemlidir. Farklı alttaşlar üzerinde büyüyen pulların kalınlığı ve morfolojisi, göç bariyer enerjisindeki (E_m) ve altlık-adatom etkileşimindeki değişiklik nedeniyle farklıdır. Göç katsayısı D ile E_m arasındaki ilişki Denklem 4'teki gibi ifade edilmektedir (Cui et al., 2016; Seo et al., 2019).

$$D \propto e^{-E_m/kT} \quad (4)$$

Burada k ve T sırasıyla Boltzmann sabiti ve alttaş sıcaklığıdır (Cui et al., 2016). Safir veya mika atlıklar üzerinde tek tabakalı ve büyük boyutlu ReX_2 pulları sentezlenebilirken, SiO_2/Si atlıklarda düzlem dışı büyüme gözlemlenmektedir (Cui et al., 2017; Seo et al., 2019). 2B ReS_2 tabakalarının SiO_2/Si ve mika altlık üzerindeki büyüme davranışı Şekil 7'de gösterildiği gibidir (Cui et al., 2017; Qin et al., 2017).

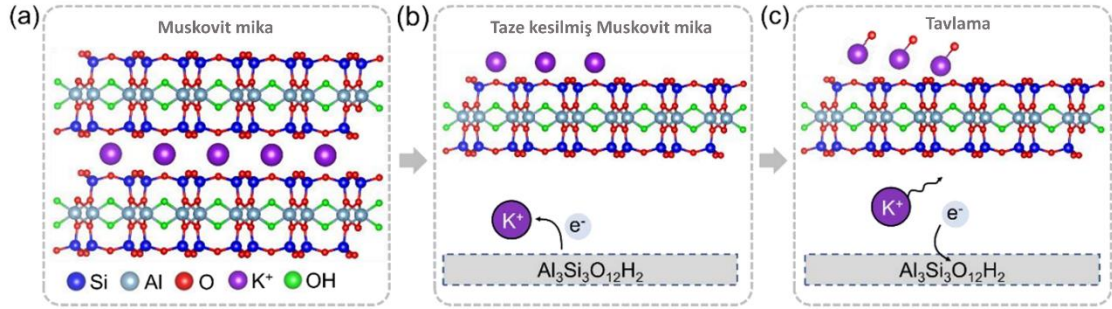


Şekil 7. 2B ReS₂ tabakalarının (a, c, d) SiO₂/Si ve (b, e, f) sınırlı reaksiyon alanına sahip mika altlık üzerindeki büyüme davranışı (Cui et al., 2017; Qin et al., 2017).

Birçok sarkan bağı olan SiO₂ ile adatomlar arasındaki güçlü etkileşimlerden dolayı SiO₂ yüzeyindeki adatomların E_m 'si, mika ve safirden daha yüksektir. SiO₂ yüzeyindeki göç katsayısı, aynı büyüme süresi ve sıcaklıkta mika ve safirden daha düşüktür. Diğer bir deyişle, mika ve safirin atomik olarak düz ve kimyasal olarak inert yüzeyi, sentez sırasında öncül göçünü kolaylaştırarak ReX₂'nin kalınlık tekdüzeliğini iyileştirmektedir. Ayrıca, ReX₂ ile safir ve mika arasındaki zayıf van der Waals etkileşiminin sentez sırasında yüzeyi sınırlayıcı bir rol oynayacağı ve düzlem dışı büyümeyi baskılayabileceği düşünülmektedir. Ancak, mikanın atomik düzlemselliği nedeniyle bu etkinin daha belirgin olduğu bildirilmiştir (Cui et al., 2016; Cui et al., 2017; Jo et al., 2018; Seo et al., 2019). Dahası, iki mika üst üste istiflenerek bir mikroreaktör inşa edilebilmekte ve böylece sınırlı bir reaksiyon alanında daha büyük pullar elde edilebilmektedir.

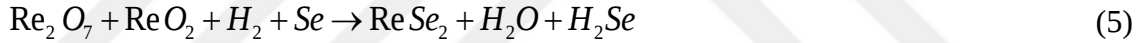
ReS₂ deneylerinde genellikle taze kesilmiş mika altlıklar kullanılmaktadır. Şekil 8 (a)'da kristal yapısı sunulan muskovit mika (KAl₂(Al₂Si₃O₁₀)(OH)₂) tabakalara ayrıldığında yapısındaki potasyum iyonları (K⁺) her bir yüzeye Şekil 8 (b)'de gösterildiği gibi rastgele yayılır ve yayılan bu K⁺ iyonları epitaksiyel büyüme sırasında çekirdeklenme bölgesi görevi görür. Taze kesilmiş mikalar oksijen ortamında tavlanarak K⁺ iyonlarının uzaklaştırılması ile atomik olarak düz bir mika yüzeyi oluşturulabilmektedir. Tavlama işlemi çekirdeklenme bölgelerini azaltarak yanal büyümeyi kolaylaştırmakta ve geniş alanlı ve yüksek kaliteli ReS₂ filmlerinin epitaksiyel büyümesini desteklemektedir. K⁺

iyonlarının önerilen oksijen destekli uzaklaştırılması Şekil 8 (c)'de sunulmuştur (Sun et al., 2023; Chiu et al., 2023).



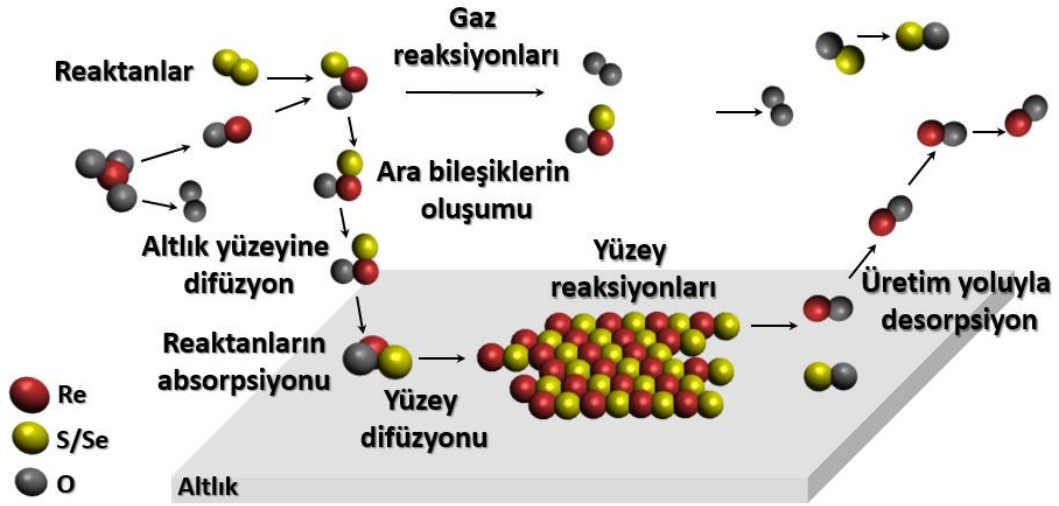
Şekil 8. (a) Muskovit mikanın kristal yapısı. (b) Taze kesilmiş mikanın şeması. (c) K⁺ iyonlarının önerilen oksijen destekli uzaklaştırılmasının şeması (Chiu et al., 2023).

2B ReSe₂ pulları büyütülürken Se'un düşük kimyasal reaktivitesi sentezlemeyi zorlaştırmaktadır (Cui et al., 2017). H₂ taşıyıcı gazı büyütme sürecine dâhil edilerek, Se H₂Se'ye indirgenebilmekte ve böylece Se'un kimyasal reaktivitesi artırılabilir (Cui et al., 2017). Se buharı, Ar ve H₂ taşıyıcı gazlar yardımıyla taşınıp Re₂O₇ ve ReO₂ ile Denklem 5'teki gibi reaksiyona girmektedir (Ge et al., 2022).



Ayrıca, çekirdeklenme yoğunluğunun baskılanması ve böylece ReSe₂'nin kalınlığının kontrol edilebilmesi için de uygun miktarda H₂'nin kullanılması önemlidir. ReSe₂, H₂ gazı kullanılmadan büyütüldüğünde, Re₂O₇ buharı aşırı bir büyüme hızına neden olmakta ve kalın pulların oluşumuna yol açmaktadır. Büyüme sürecine bir miktar H₂ eklendiğinde, uçucu Re₂O₇'nin düşük değerlik durumuna (ReO_{3-x}) indirgenmesi ile daha ince tabakalar büyütme mümkün olmaktadır. Ancak, aşırı H₂ (>10 sccm), uçucu Re₂O₇'nin tamamını daha az uçucu ReO₂ veya Re'ye indirger ve bu, ReSe₂'nin büyüme verimliliğinin azalmasına neden olur (Cui et al., 2017; Ge et al., 2022).

Çekirdeklenmenin baskılanması ve büyük boyutlu pulların elde edilmesi için ReSe₂ üretim sürecine NaCl tuzu da dahil edilebilmektedir (Jiang et al., 2020). CVD, buhar fazındaki öncülerin Şekil 9'daki gibi yüzey absorpsiyonu, yüzey difüzyonu ve bağ oluşumu yoluyla katılara dönüştüğü bir buhar-katı-katı (vapor-solid-solid-VSS) büyüme prosesidir.



Şekil 9. 2B malzemelerin CVD ile büyüme aşamaları.

NaCl benzeri tuzlarla desteklenen büyümelerde VSS ve buhar-sıvı-katı (vapor-liquid-solid-VLS), aynı anda meydana gelmektedir. Cl, geçiş metali oksitleri (TMO'lar) ile reaksiyona girerek düşük erime noktalı uçucu metal oksiklorürler (MO_xCl_y) oluşturmakta ve bu metal oksiklorürler, TMDC VSS büyümesini başlatmaktadır. Na ise buhar fazı geçişi olmadan TMO'larla reaksiyona girerek doğrudan büyüme altlığı üzerinde yüksek erime noktasına sahip uçucu olmayan erimiş tuzlar (Na_xMO_y) üretmektedir. VLS büyüme sürecinde, katı 2B TMDC'ler sıvı eriyiklerden üretilmektedirler (Li et al., 2021). Böylece, NaCl sayesinde çekirdeklenme baskılanıp büyük ve tek katmanlı pullar sentezlenebilmektedir (Jiang et al., 2020).

2.3. 2B Malzemelerin Transfer Yöntemleri

CVD yönteminde, düzlem dışı büyüme gibi durumların önlenmesi için alttaş seçimi önemlidir. Ancak, cihaz imalatı için üretilmiş 2B malzemeler istenen bir malzemeye veya alttaşa aktarılması gerekmektedir (Liang et al., 2020). Zayıf vdW bağları, kafes uyumsuzluğu sorunu olmadan transfer yöntemleriyle 2B malzemelerin rastgele kombinasyonlarının tasarlanmasını mümkün kılmaktadır (Castellanos-Gomez et al., 2014; Liang et al., 2020).

Geleneksel transfer yöntemlerinde, taşıyıcı olarak polimetil metakrilat (PMMA), polipropilen karbonat (PPC), polikarbonat (PC), polivinil pirolidon (PVP) veya polidimetilsiloksan (PDMS) kullanılmaktadır (Cao et al., 2020). Taşıyıcı polimerin yüzeye yapışması ve transferden sonra yüzeyden uzaklaştırılması, arayüz temizliğini ve

dolayısıyla üretilecek cihazın performansını etkileyeceği için kritik öneme sahiptir (Cao et al., 2021). Taşıyıcı polimeri numuneden transferden sonra çıkarmak için kullanılan işlem kontaminasyona neden olmamalıdır. Ayrıca, polimerin yüzeye daha iyi yapışması için polimer yüzey gerilimi, van der Waals bağlanmış yüzeyin gerilimine yakın olmalıdır (Cao et al., 2020; Cao et al., 2021). 2B malzemeleri taşıyıcı polimerle hedef substrata aktarmak ve ardından taşıyıcı polimeri numuneden çıkarmak için farklı transfer yöntemleri kullanılır. Transfer yöntemleri temel olarak kuru ve ıslak transfer teknikleri olarak sınıflandırılır (Castellanos-Gomez et al., 2014). 2B malzemelerin ıslak transferi için çoğunlukla PMMA destekli transfer yöntemi kullanılmaktadır (Hafeez et al., 2016; Kim et al., 2020; Li et al., 2021; Jang et al., 2022).

PMMA çözeltisi numune yüzeyine damlatılır ve döndürülerek kaplanır. Ardından, malzemenin büyütüldüğü alttaş (donör alttaş) ve malzeme uygun aşındırıcıda ayrılır ve ıslak transfer işleminin neden olduğu kontaminasyonu gidermek için numune deiyonize su ile yıkanır. Son olarak, PMMA asetonda çözülür ve hedef alttaşa aktarılan 2 boyutlu malzemeden uzaklaştırılır (Kim et al., 2020; Jang et al., 2022) Ancak kullanılan çözeltiler, kontaminasyon ve kalıntılara neden olmaktadır. Daha temiz bir transfer prosesi için kuru transfer yöntemleri geliştirilmiştir. Kuru transfer yöntemlerinde pulların hedef alttaşa hangi konumuna aktarılacağı daha kolay belirlenebilmektedir. Bu nedenle, kuru transfer yöntemi karmaşık cihaz mimarilerinin üretimini kolaylaştırır (Cao et al., 2020; Martanov et al., 2020; Buapan et al., 2021). Literatürde 2B malzeme transferi için yaygın olarak kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. 2B TMDC Transfer Yöntemleri (Castellanos-Gomez et al., 2014; Li et al., 2019; Kim et al., 2020; Jang et al., 2022; Liu et al., 2024; Cheliotis et al., 2024).

Yöntem	Destek Malzemesi	Hedef Alttaş	Avantajlar	Dezavantajlar	Gerekli Ekipman	Süre
Islak Transfer	PMMA, PVA	SiO ₂ /Si, PET, cam	Düşük maliyet, geniş alan	Yüksek kontaminasyon	Dödürerek kaplama	~1-2 gün
Elektrokimyasal deliminyasyon	PMMA	SiO ₂ /Si	Aşındırıcı yok, çevre dostu	Sadece metal alttaşlarda uygulanabilir	DC güç kaynağı, elektrolit hücre	~60 dk

Tablo 1. 2B TMDC Transfer Yöntemleri (Castellanos-Gomez et al., 2014; Li et al., 2019; Kim et al., 2020; Jang et al., 2022; Liu et al., 2024; Cheliotis et al., 2024)
(devamı).

Kuru Transfer (Polimer Damga)	PDMS, PC, PPC, PVA	Diğer 2B katmanlar, devreler	Hassas hizalama, kalıntısız	Küçük alan, yavaş	Mikromani pülatör, ısıtma platformu	~30- 60 dk
DI su deliminasyonu	PDMS	SiO ₂ /Si, cam	Temiz, kalıntısız	Film kırılabilir	Isıtma platformu	~10- 30 dk
Lazer Destekli Transfer	Yok	PET, Devre yüzeyi	Temassız, hızlı	Lazer hasarı riski	UV/IR lazer, optik masa	~1dk
Termal Bant Transferi	Termal bant, PMMA	PET, cam	Büyük alan, hızlı	Yapışkan kalıntısı, kırıksıklık	Rulo pres, sıcak tabla	~10- 20 dk

2.4. Fotodedektörler

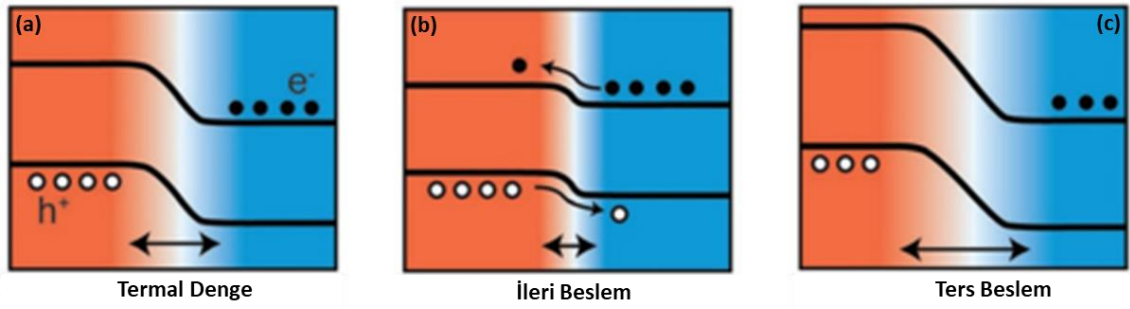
Fotodedektörler, ışığı elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlar olarak, modern çok işlevli teknolojilerin temel bileşenlerinden biridir. Günümüze kadar geliştirilen fotodedektör teknolojileri, günlük yaşamımızı etkileyen çok geniş bir uygulama yelpazesini kapsamaktadır. Bu uygulamalardan bazıları, biyomedikal görüntüleme için X-ışınları, litografi ve canlı hücre incelemesi için UV ışık, dijital kamera ve video görüntüleme için görünür ışık algılamadır (Huo et al., 2018).

Fotodedektörler, çalışma prensiplerine göre fotovoltaiik, fotoiletken, fototermoelektrik ve fotobolometrik olarak sınıflandırılmaktadır (Jiang et al., 2018). Fotovoltaiik dedektörlerde fotojenere taşıyıcıları hızla ayırmak için yerleşik elektrik alan kullanılmaktadır. Elektron-boşluk (e-h) çiftleri, yarı iletken ve metal kontak yüzeyi arasındaki arayüzden, bir p-n ekleminden veya Schottky bağlantısından kaynaklanan yerleşik elektrik alan ile ayrılmaktadır. Fotoiletken dedektörlerde ise fotonlar yarı iletkende elektron-boşluk çiftleri oluşturarak malzemenin direncini değiştirmektedir. Fotoiletkenlik ile çalışan dedektörlerde harici güç kaynağına ihtiyaç duyulurken fotovoltaiik etki ile çalışan dedektörler harici besleme gerektirmeyen (self-powered) modda çalışabilmektedirler (Jiang et al., 2018).

Fototermoelektrik etki, ışık ışınlamıyla oluşan termal bir etkidir. Işık, yarı iletken kanalda bir sıcaklık gradyanı oluşturmaktadır ve eğer malzeme bir Seebeck katsayısına sahipse bu sıcaklık gradyanı boyunca bir fototermoelektrik gerilim oluşmaktadır. Bolometrik dedektörlerin çalışma mantığı ise foton emilimiyle oluşan ısıtma etkisinden dolayı sıcaklığa duyarlı bir malzemenin öz direnç değişimine dayanmaktadır (Long et al., 2021).

Fotodedektörler, yarı iletken cihaz mimarilerine göre ise diyot tipi (iki terminalli fotodiyotlar) ve alan etkili transistör tabanlı fotodetektörler (FET tipi) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma fiziksel prensiplerden ziyade yapısal mimariye dayanmaktadır. FET tipi fotodedektörler, kaynak ve savak terminallerine ek olarak ışığa duyarlı bir kapı elektrodu içeren üç terminalli transistör mimarisine sahiptir. Uygulanan kapı gerilimi yarı iletken kanaldaki taşıyıcı yoğunluğunu düşürerek karanlık akımı bastırmakta ve ışıkla tetiklenen iletkenlik değişimi sayesinde yüksek duyarlılık elde edilebilmektedir. Buna karşılık diyot fotodedektörlerde, p-n eklem veya Schottky bariyerli iki terminalli yapılar kullanılmaktadır ve fotonların oluşturduğu elektron-boşluk çiftleri dahili elektrik alan ile ayrıştırılarak toplanmaktadır (Taffelli et al., 2021).

Bir p-n heteroeklem, p-tipi ve n-tipi iki farklı yarı iletkenin fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan elektronik bir yapıdır. Bu yapı sayesinde, iki farklı yarı iletkenin bant yapıları arasında bir hizalanma gerçekleşmekte ve bu da eklem bölgesinde Şekil 10'daki gibi bir "bant bükülmesi (band bending)" oluşturmaktadır. P-tipi ve n-tipi malzemeler arasında serbest elektron ve boşluk taşınımı gerçekleşmektedir. N-tipi bölgedeki serbest elektronlar p-tipi bölgeye, p-tipi bölgedeki boşluklar ise n-tipi bölgeye doğru difüze olur. Bu taşıyıcı akışı, her iki bölgede yük ayrışması oluşturur ve sonucunda bir iç elektrik alan meydana gelir. Bu alan, taşıyıcıların daha fazla hareket etmesini engeller ve böylece eklem bölgesinde Şekil 10 (a)'daki gibi bir boşaltılmış bölge (depletion region) oluşur (Mathew et al., 2021).



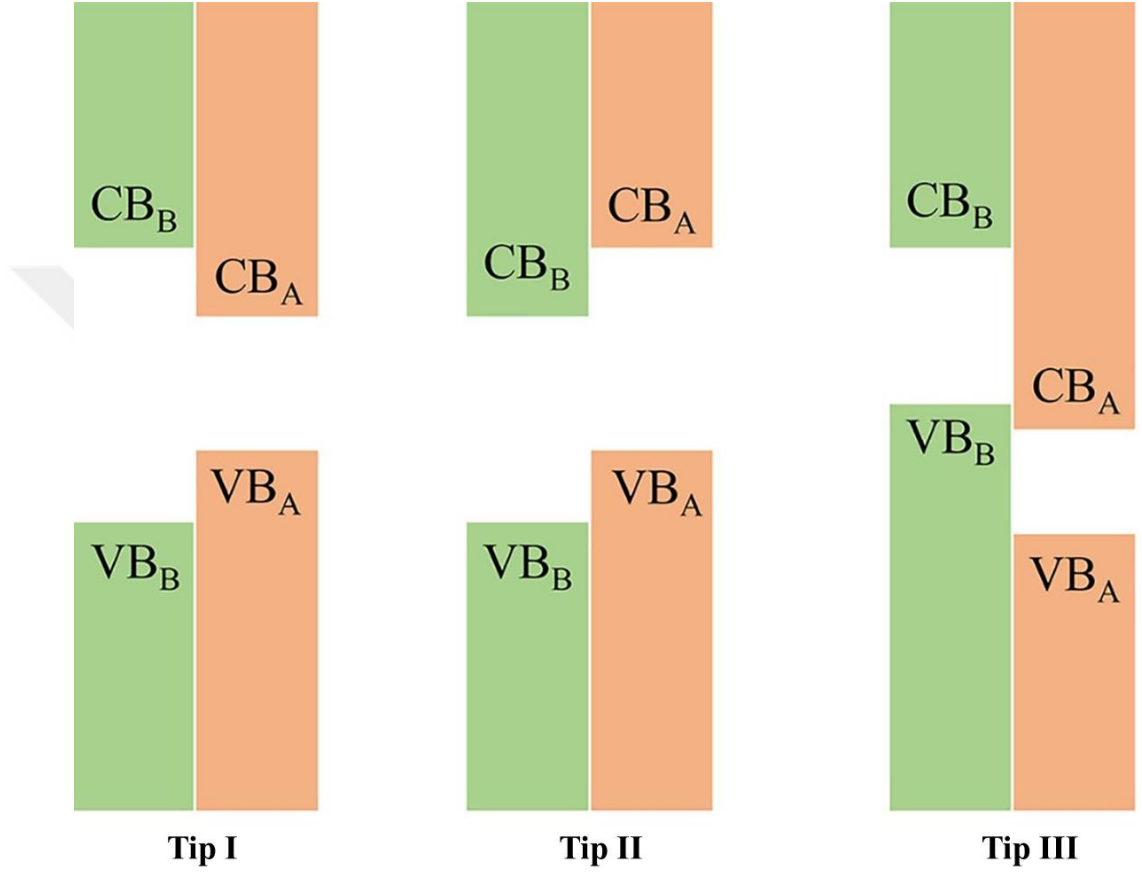
Şekil 10. (a) Termal denge durumunda, (b) ileri ve (c) ters beslem koşulları altında bir p-n eklem bant diyagramlarının şematik gösterimi. Ok işaretleri boşaltılmış bölgeyi ve bu bölgenin genişliğindeki değişimi göstermektedir (Mathew et al., 2021).

Dış gerilim uygulandığında (ileri ya da ters beslem), bu boşaltılmış bölgenin genişliği değişmektedir. İleri beslemde boşaltılmış bölge Şekil 10 (b)'deki gibi daralırken ve taşıyıcı geçişi artar; ters beslem altında ise boşaltılmış bölge Şekil 10 (c)'deki gibi genişler ve akım sınırlanır. Bu doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) davranışı, p-n diyotların temel özelliğidir (Mathew et al., 2021). P-n heteroeklemleri, malzemelerin bant hizalanmasına bağlı olarak üç temel tipe ayrılmaktadır (Feng et al., 2021).

Tip I bant hizalamasında (Straddling Gap) bir malzemenin hem iletkenlik bandı minimumu (conduction band minimum-CBM) hem de değerlik bandı maksimumu (valence band maximum-VBM), diğer malzemenin bant aralığı içinde yer alır. Bu bant hizalamasında elektronlar ve boşluklar aynı katmanda hapsolmaktadır. Bu durum ışık emisyonu verimliliği arttırdığı için tip I heteroeklem yapı ışık yayan diyotlar (LED) ve lazerlerde tercih edilmektedir.

Tip II bant hizalamasında (Staggered Gap), bir malzemenin bant aralığı diğerinkiyle kısmen örtüşür. Diğer bir deyişle, tabakalardan birinin CBM'si diğerinin bant aralığı içinde yer alır ve bu durum CBM ile VBM'nin farklı katmanlarda bulunmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu nedenle elektron ve boşluklar farklı katmanlarda lokalize olur. Bu yük dağılımı sonucu arayüzde bir yerleşik potansiyel fark (built-in potential) oluşur. Heteroeklem yapıya ışık uygulandığında oluşan elektron-delik çiftleri, yerleşik potansiyel farkın etkisiyle ayrılır, rekombinasyon azalır ve taşıyıcı ömrü artar. Tip II yapılar, ışıkla oluşan taşıyıcıların etkin biçimde ayrılması ve toplanması açısından büyük avantaj sağladığı için fotodedektör ve güneş pili tasarımlarında kullanılmaktadır. Tip III bant hizalamasında (Broken Gap) ise malzemelerden birinin bant kenarları tamamen diğerinin bant aralığı dışındadır. Bu yapı, taşıyıcıların klasik olarak

geçemeyeceği bir potansiyel bariyer oluşmaktadır ve taşıyıcı geçişleri sadece kuantum tünelleme ile mümkündür. Elektronlar bir malzemenin valans bandından, diğer malzemenin iletim bandına doğrudan tünelleyeabilmekte ve böylece çok hızlı taşıyıcı geçişi sağlanabilmektedir. Bu tip yapılar tünelleme etkisine dayalı cihazlarda kullanılmaktadır. Bant hizalama tiplerinin gösterimleri Şekil 11'deki gibidir (Feng et al., 2021; Mathew et al., 2021).



Şekil 11. Tip I, tip II ve tip III bant hizalaması gösterimi. Yeşil renk, B yarı iletkeninin bant kenarı konumunu, turuncu renk ise A yarı iletkeninin bant kenarı konumunu temsil etmektedir (Feng et al., 2021).

Fotodedektörlerin performansı, R , EQE ve D^* gibi bazı temel parametrelerle tanımlanmaktadır. R , fotoakımın gelen ışığın gücüne oranını ifade etmektedir ve Denklem 6'daki gibi ifade edilir (Geng et al., 2019).

$$R = I_{ph} / P_{in} A \quad (6)$$

Denklemdeki I_{ph} , A ve P_{in} sırasıyla fotoakımı, dedektörün aydınlatılan alanını ve gelen ışığın gücünü ifade etmektedir. Fotoakım, yarı iletken bir aygıtın ışık altında ürettiği

toplam akımdan karanlık koşullarda ölçülen akımın çıkarılmasıyla elde edilen akım bileşenidir. Fotodedektör için önemli başka bir parametre olan D^* , Denklem 7'deki gibi hesaplanır (Geng et al., 2019).

$$D^* = RA^{1/2} / (2qI_{karanlık})^{1/2} \quad (7)$$

Burada $I_{karanlık}$, karanlık akımı ve q elektron yükünü ifade etmektedir. Dedektörün sinyali gürültüden ayırt edebileceği eşdeğer gürültü gücü (NEP) ise Denklem 8'deki gibi ifade edilmektedir (Geng et al., 2019; Silva et al., 2021).

$$NEP = A^{1/2} / D^* \quad (8)$$

Gelen foton başına üretilen fotoelektronların sayısı, EQE ile tanımlanır ve Denklem 9'daki gibi yüzde olarak verilir (Geng et al., 2019).

$$EQE = hcR\lambda^{-1}q^{-1} \times 100\% \quad (9)$$

Burada h , c ve λ sırasıyla Planck sabiti, ışık hızı ve gelen ışık dalga boyunu ifade etmektedir (Geng et al., 2019; Silva et al., 2021).

Geleneksel yarı iletkenler giyilebilir ve taşınabilir optoelektronik için düşük maliyetli üretim, şeffaflık ve esneklik benzeri beklentileri karşılayamamaktadır. 2B malzemeler bükülebilir ve esnek olmalarının yanı sıra ayarlanabilir bant genişlikleri, uygun maliyetli hazırlanma ve sarkan bağ içermeyen doğal pasifleştirilmiş yüzey gibi özellikleri sayesinde optoelektronik uygulamalarda yüksek potansiyel sunmaktadır (Long et al., 2019). Ayrıca 2B malzemeler üst üste istiflenerek kafes uyumsuzluğu olmadan vdW heteroeklem yapıları oluşturulabilmektedir (Liang et al., 2020).

Potansiyel uygulama alanlarını keşfetmek amacıyla son yıllarda ReSe_2 ve ReS_2 yapıları kullanılarak çok sayıda fotodedektör üretilip karakterize edilmiştir. Üretilen fotodedektörlerin performansı R , EQE ve yanıt süreleri göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. ReS_2 fotodedektörler için elde edilen R ve EQE değerleri benzer iki terminalli cihaz yapısına sahip diğer 2B malzemelerle karşılaştırıldığında çok daha yüksektir. ReS_2 fotodedektörler yüksek fotoduyarlılıkları sayesinde, karanlık bir odadaki zayıf ve sınırlı aydınlatmadan gelen zayıf sinyalleri bile tespit edebilmektedir (Li et al., 2020). Bu durumun ReS_2 'nin tuzak durumları tarafından artırılan fototaşıyıcıların uzun ömrüne bağlı olarak yüksek fotokazancı sayesinde olduğu düşünülmektedir. Buna karşın ReS_2 fotodedektörlerde, yanıt hızı oldukça yavaştır. ReSe_2 fotodedektörler ise

düşük taşıyıcı hareketliliği nedeniyle göreceli olarak daha düşük duyarlılık değerlerine sahiptir, ancak yanıt hızları yüksektir (Li et al., 2020).

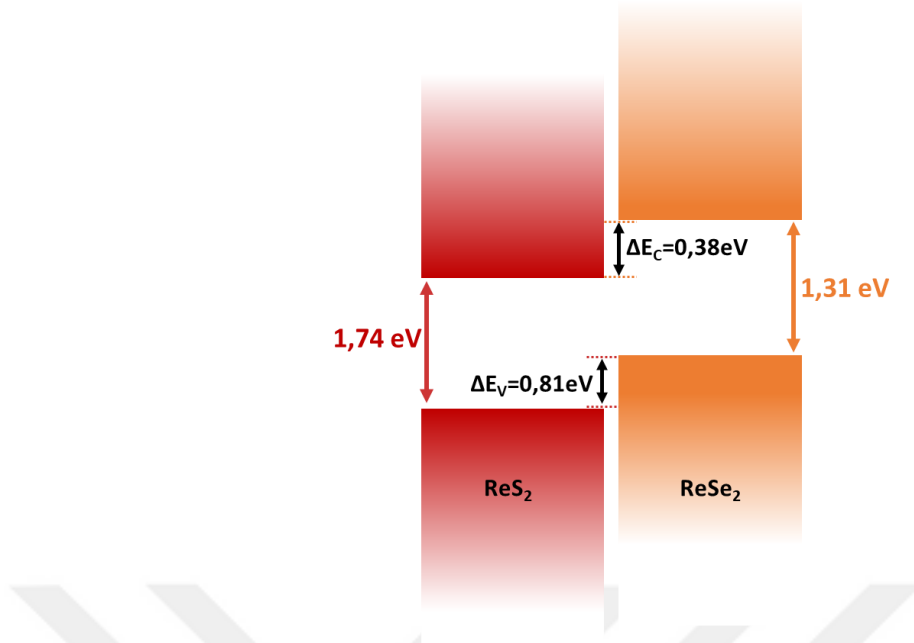
ReX₂ fotodetektörlerin uygulanabilirliğini artırmak için, katkılama, kimyasal modifikasyon, askıya alınmış kanal ve heteroyapı oluşturma gibi çeşitli yöntemlerle performanslarını artırmaya yönelik son dönemde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğunda ReX₂ ve farklı özelliklere sahip yarı iletkenler birleştirilerek p-n eklem tip II bant hizalamasına sahip heteroyapı cihazlar tasarlanmıştır (Elahi et al., 2020; Afzal et al., 2021; Tian and Liu, 2021; Wang et al., 2021; Li et al., 2022; Jawa et al., 2023).

2B malzemeler arasında oluşan bant hizalaması tipi Anderson modeli kullanılarak belirlenebilmektedir. 2017’de yapılan bir çalışmada Anderson Modeli’nin dikey 2B heteroeklem yapılarında da geçerli olduğu ispatlanmıştır. Anderson modeline göre, iletim bandı ofseti (ΔE_C , Conduction band offset-CBO) elektron ilgisi farkına, değerlik bandı ofseti (ΔE_V , Valence band offset-VBO) ise CBO ve bant aralığı farkının süperpozisyonuna eşittir. Anderson modeline ait matematiksel ifade Denklem 10 ve Denklem 11’de verilmiştir (Chiu et al., 2017; Jo et al., 2018).

$$\Delta E_C = (\chi_{\text{ReSe}_2} - \chi_{\text{ReS}_2}) \quad (10)$$

$$\Delta E_V = (\chi_{\text{ReS}_2} + E_{g\text{ReS}_2}) - (\chi_{\text{ReSe}_2} + E_{g\text{ReSe}_2}) \quad (11)$$

Denklemdaki χ_{ReS_2} , χ_{ReSe_2} , $E_{g\text{ReS}_2}$ ve $E_{g\text{ReSe}_2}$ sırasıyla ReS₂’nin elektron ilgisini, ReSe₂’nin elektron ilgisini, ReS₂’nin bant aralığını ve ReSe₂’nin bant aralığını ifade etmektedir. Literatürde sunulan çalışmalar göz önüne alındığında, tek tabakalı ReS₂ ve ReSe₂’nin bant aralığı değerleri yaklaşık 1,74 eV ve 1,31 eV, elektron ilgileri ise yaklaşık 4,30 eV ve 3,92 eV olacaktır (Li et al., 2016; Cui et al., 2016; Cui et al., 2017; Jo et al., 2018; Varghese et al., 2020; Jiang et al., 2020; Sun et al., 2023). Anderson Modeli’ne göre, ReSe₂/ReS₂ heteroekleminde iletim bandı kayması ~0,38 eV, değerlik bandı kayması ise ~0,81 eV’a eşittir (Chiu et al., 2017; Jo et al., 2018). Dolayısıyla, ReSe₂ ve ReS₂ tabakaları arasında, Şekil 12’deki gibi, optoelektronik uygulamalar için verimli olduğu bilinen tip II bant hizalaması oluşmaktadır (Cho et al., 2017; Li et al., 2021; Li et al., 2022).



Şekil 12. ReSe₂/ ReS₂ enerji bant diyagramı.

Foton akımı ve taşıyıcı rekombinasyon mekanizmalarının daha derinlemesine anlaşılması, fotodetektör performansının optimize edilmesi açısından gereklidir. ReX₂ fotodetektörleri üzerine yapılan farklı çalışmalarda bildirilen performans göstergelerindeki değişkenlik, cihaz üretimi, kontak metalleri ve ölçüm ortamının fotodedeksiyon performansında önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu nedenle, ReX₂ tabanlı fotodetektörlerin cihaz performansını artırmaya yönelik daha sofistike ilerlemelere acil ihtiyaç vardır.

2.5. 2B Malzeme Tabanlı Aygıtların Modellenmesi

2B malzemelerin keşfi ve elektroniğe uygulanması henüz gelişim aşamasındadır. 2B malzemeler yeni cihaz konseptleri için umut verici fırsatlar sunmaktadır. Bu fırsatları değerlendirmek için, deneysel ilerlemeye güçlü bir teorik destek gerekmektedir. Bu bağlamda, malzeme ve cihaz tanımlamaları için farklı doğruluk ve karmaşıklık seviyelerini birleştiren çok ölçekli bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır.

Literatürde 2B malzeme tabanlı elektronik aygıtların modellenmesi için Mikroelektronik ve Fotonik Yapıların Analizi (AMPS-1D-analysis of microelectronic and photonic structures), Heteroyapıların Simülasyonu için Otomasyon (Automat For Simulation of Heterostructures, AFORSHET), bilgisayar destekli tasarım teknolojisi (TCAD, technology computer aided design), tek boyutlu güneş hücresi kapasitans

simülatörü (SCAPS-1D-one-dimensional solar cell capacitance simulator), COMSOL multiphysics ve benzeri yazılım paketleri kullanılmaktadır (Marin et al., 2018; Aydın and Duman, 2023; Aydın, 2025). Bu yazılım paketlerinden SCAPS-1D, detaylı optik hesaplamalar içermesi, kompleks heteroyapı oluşturma imkanı sunması, kullanıcı dostu arayüzü, ücretsiz olması, kolay erişilebilir olması ve düzenli olarak güncellenmesi sebebiyle yaygın biçimde kullanılmaktadır (Burgelman et al., 2000).

Gent Üniversitesi'nde geliştirilen SCAPS-1D, yarıiletken cihaz yapılarının elektriksel özelliklerini modelleyerek cihaz performansını öngörür. SCAPS-1D, heteroeklemlili çok katmanlı yapıları tek boyutta modelleyerek enerji bant diyagramı, taşıyıcı yoğunluk profili, akım-gerilim (I - V) karakteristiği, fotoduyarlılık ve harici quantum verimliliği gibi kritik cihaz çıktılarını hesaplayabilmektedir. Belirli bir malzeme yapısıyla sınırlı olmayan program, farklı fotovoltaiik cihaz türlerinin simülasyonunda kullanılmakta ve akademik çalışmalarda yaygın bir modelleme aracı olarak kabul görmektedir (Burgelman et al., 2000; Karabulut et al., 2025). SCAPS-1D, sırasıyla Denklem 12, 13 ve 14'te sunulan Poisson denklemi, elektron süreklilik denklemi ve boşluk süreklilik denkleminin çözümüne dayanmaktadır.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x^2} + \frac{q}{\epsilon} [p(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p - \rho_n] = 0 \quad (12)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = -G_{op}(x) + R_{net}(x) \quad (13)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = G_{op}(x) - R_{net}(x) \quad (14)$$

Denklem 12'de, Ψ elektrostatik potansiyeli, q elektron yükünü, ϵ dielektrik sabitini, N_D ve N_A donör ve alıcı konsantrasyonu, $n(x)$ ve $p(x)$ elektron ve boşluk konsantrasyonlarını ifade etmektedir. ρ_n ve ρ_p ise sırasıyla elektron ve boşluk dağılımlarını temsil eder. Denklem 13 ve 14'te, J_p ve J_n sırasıyla boşluklar ve elektronlar tarafından oluşturulan akım yoğunluğunu göstermektedir. Ayrıca, R_{net} net rekombinasyon ve G_{op} optik üretim oranını ifade etmektedir. Ayrıca SCAPS-1D, hesaplamalar için tabakaların kalınlık, elektron ilgisi, bant aralığı ve dielektrik geçirgenlik gibi özelliklerini kullanmaktadır (Aydın and Duman, 2023; Aydın, 2025).

3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

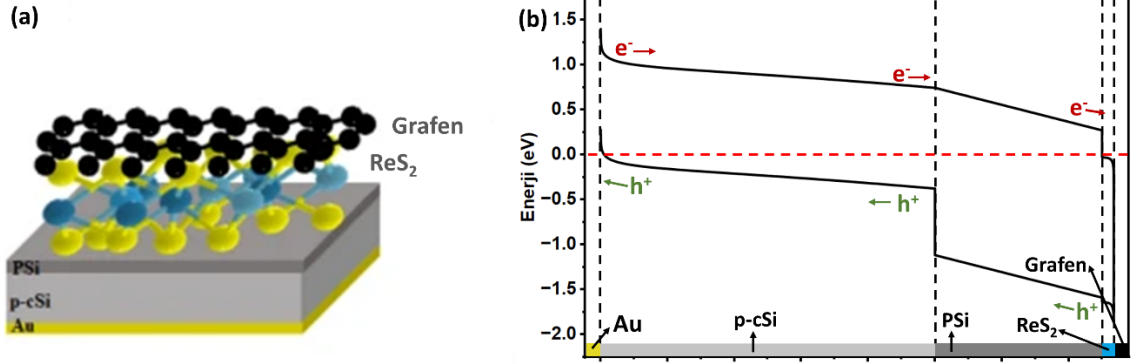
3.1. SCAPS-1D ile 2B Tabanlı Fotonik Aygıt Modellenmesi

2B malzemelerin cihaz uygulamalarında SCAPS-1D benzeri yazılım paketleri kullanılarak düşük maliyetli ve zaman tasarruflu araştırmalar yapılması mümkündür. Bu tez çalışması kapsamında p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapıları SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak incelenmiştir. Simülasyonlarda kullanılan parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir. Simülasyonlar 300 K sıcaklıkta AM 1,5 G aydınlatma (100 mW/cm² güç yoğunluğu) altında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Simülasyonlarda kullanılan parametreler (Aydın and Duman, 2023; Jo et al. 2024; Ghetiya et al. 2025).

Malzeme özellikleri	Cihaz parametreleri				
	Grafen	ReS ₂	ReSe ₂	PSi	p-cSi
Kalınlık (nm)	0,3	3,5	3,75	5×10 ³	50×10 ³
Bant aralığı, E_g (eV)	0,1	1,61	1,39	1,86	1,124
Elektron ilgisi, χ (eV)	4,2	4,3	3,92	4,05	4
Dielektrik geçirgenlik (ϵ_r)	15	12	15	4	11,9
İletim bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	1×10 ¹⁵	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	3×10 ¹⁹	3×10 ¹⁹
Valans bandı durum yoğunluğu (cm ⁻³)	1×10 ¹⁵	1×10 ¹⁹	1×10 ¹⁹	3×10 ¹⁹	3×10 ¹⁹
Elektron termal hızı (cms ⁻¹)	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷
Boşluk termal hızı (cms ⁻¹)	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷	1×10 ⁷
Elektron mobilitesi, μ_n (cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	1×10 ⁵	40	3,2×10 ²	1350	1350
Boşluk mobilitesi, μ_p (cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	10	10	3,8×10 ²	450	450
Donör konsantrasyonu, N_D (cm ⁻³)	1×10 ²²	3×10 ¹⁹	0	0	0
Alıcı konsantrasyonu, N_A (cm ⁻³)	0	0	1×10 ¹⁸	1×10 ¹²	1×10 ¹⁹
Kontak parametreleri	Altın (Au)	Alüminyum (Al)	Grafen		
İş fonksiyonu (eV)	5,4	4,2	4,2		

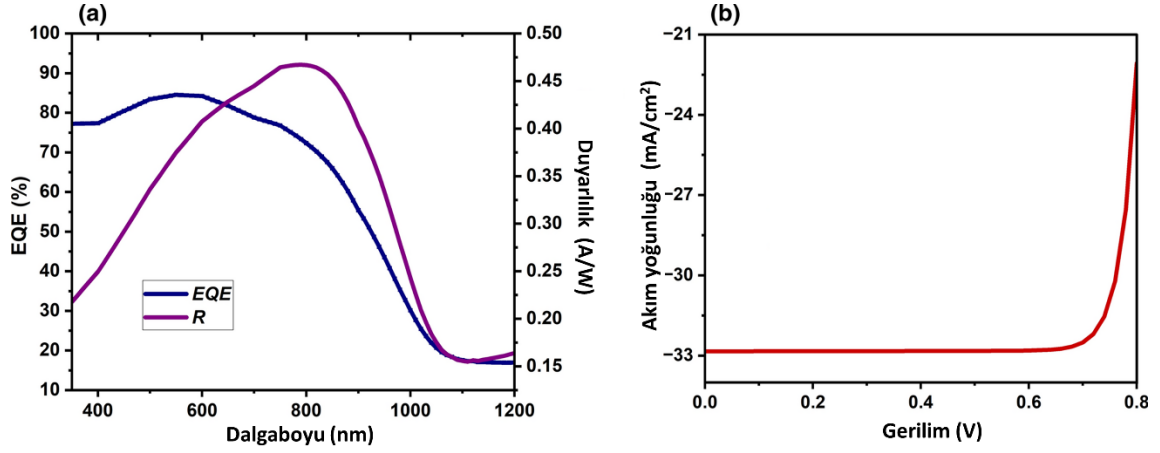
p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen cihazının şematik yapısı ve enerji bant diyagramı Şekil 13’te sunulmuştur.



Şekil 13. (a) p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen cihazının şematik yapısı ve (b) enerji bant diyagramı.

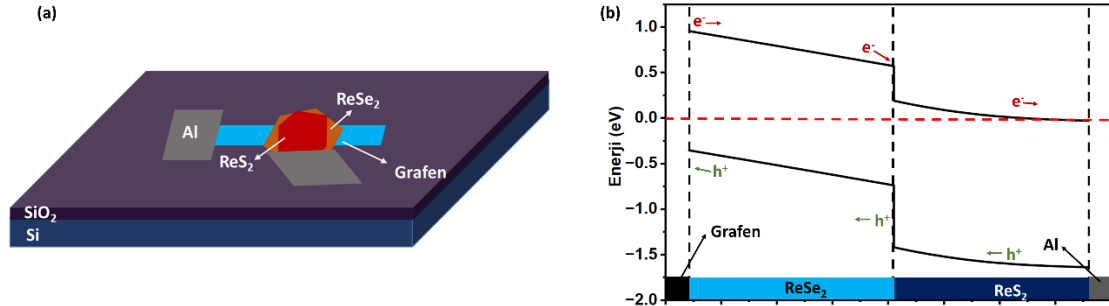
İncelenen yapıda, Gözenekli silikon, büyük yüzey-hacim oranı, yüzey pasifleştirme, dokulandırma etkileri ve geniş bant aralığı özellikleri nedeniyle özellikle UV dalga boyu aralığında aygıtın R ve EQE 'sini artırabildiğinden ışık soğurucu katman olarak kullanılmıştır. Ancak, Grafen/PSi aygıtlarda arayüzde meydana gelen rekombinasyonlar sebebiyle verim düşüktür. Arayüz sorununu çözmek için ek bir ara katman kullanılabilir. Modellenen cihazda, bu rekombinasyonları azaltmak için yapıya ReS₂ ara katmanı eklenmiştir. N-tipi yarıiletken özellik gösteren ReS₂ ile p tipi Silisyum kullanılarak üretilen PSi arasında p-n eklem oluşturulmuştur. Aydınlatma altında, elektron/boşluk çiftleri oluşur ve p-n arayüzündeki yerleşik voltajla ayrılırlar. Azınlık taşıyıcılar p ve n bölgelerine doğru hareket eder. Böylece, hücre açık devre iken, p ve n bölgelerindeki taşıyıcı yoğunluğu artar ve V_{OC} oluşturur. Kısa devre durumunda ise fazla taşıyıcılar elektrotlarda birikerek J_{SC} neden olur (Patel and Tyagi, 2015; Patel and Tyagi, 2017).

Cihaz üzerine düşen fotonların sayısı ile cihaz tarafından toplanan yük taşıyıcılarının sayısı arasındaki oran, EQE olarak tanımlanır. R ise hücre tarafından üretilen akım ile cihaz üzerine gelen optik güç arasındaki orandır. p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen cihazının EQE , R ve $J-V$ eğrileri Şekil 14'te sunulmuştur.



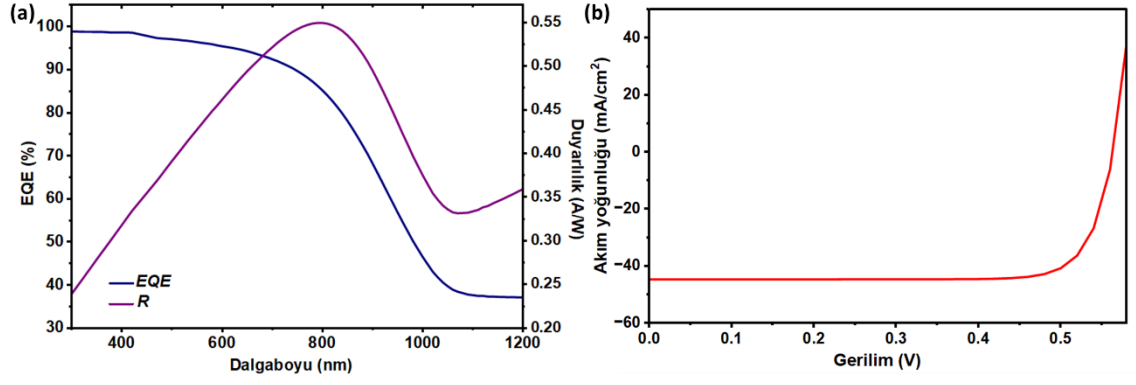
Şekil 14. p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen cihazının (a) EQE, R ve (b) J - V eğrileri.

p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen yapısı için 550 nm’de %84,5 EQE ve 790 nm’de 0,467 A/W R elde edilmiştir. Ayrıca, J_{SC} ve V_{OC} sırasıyla 32,83 mA/cm² ve 0,88 V olarak elde edilmiştir. Tez kapsamında Grafen, ReS₂ ile ReSe₂’nin üstün özelliklerini birleştirmek amacıyla Grafen/ReSe₂/ReS₂ cihazı da modellenmiştir. ReSe₂, p-tip yarıiletken özelliği gösterirken ReS₂, n-tip yarıiletken özelliği gösterir. Bu nedenle, ReSe₂ ile ReS₂ arasında diyota benzer doğrultma davranışı gösteren bir p-n eklem oluşur (Cho vd., 2017; Li vd., 2021). Grafen/ReSe₂/ReS₂ cihazının şematik yapısı ve enerji bant diyagramı ise Şekil 15’te sunulmuştur.



Şekil 15. (a) Grafen/ReSe₂/ReS₂ cihazının şematik yapısı ve (b) enerji bant diyagramı.

ReSe₂ ile ReS₂ arasında optoelektronik uygulamalar için verimli olduğu bilinen tip II bant hizalaması oluşmaktadır. Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı için EQE, R ve J - V eğrileri Şekil 16’da gösterilmiştir.



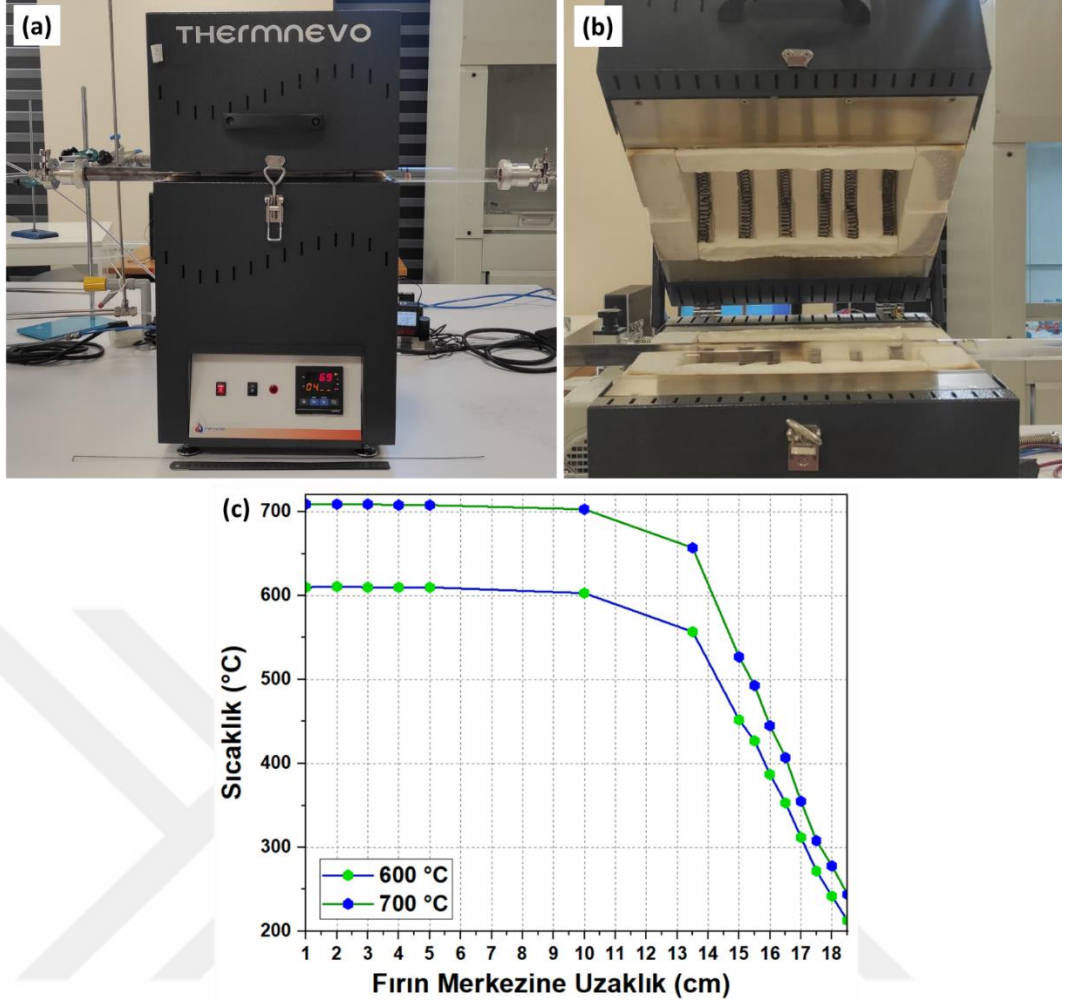
Şekil 16. Grafen/ReSe₂/ReS₂ cihazının (a) EQE, R ve (b) J-V eğrileri.

550 nm’de % 96,37 EQE ve 790 nm’de 0,54 A/W R elde edilmiştir. Ayrıca, J_{SC} ve V_{OC} sırasıyla 44,68 mA/cm² ve 0,56 V olarak elde edilmiştir. Malzeme yelpazesini genişletmedeki temel sorun malzeme uyumsuzluğudur. Ancak, 2B malzemeler diğer malzemelerle birleştirildiğinde kafes uyumuna ihtiyaç duymadıklarından, kafes uyumsuzluğu olmadan heteroyapılar oluşturmak için kullanılabilirler. Henüz, Grafen/ReSe₂/ReS₂ ve p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen yapılarını inceleyen deneysel bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak tez çalışmasında kullanılan transfer yöntemleri yardımıyla bu yapının üretilmesi mümkündür. Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı için p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen yapısına kıyasla daha yüksek verimlilik ve duyarlılık elde edildiği için tez kapsamında Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı deneysel olarak üretilmiştir.

3.2. ReSe₂ Yapılarının CVD ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu

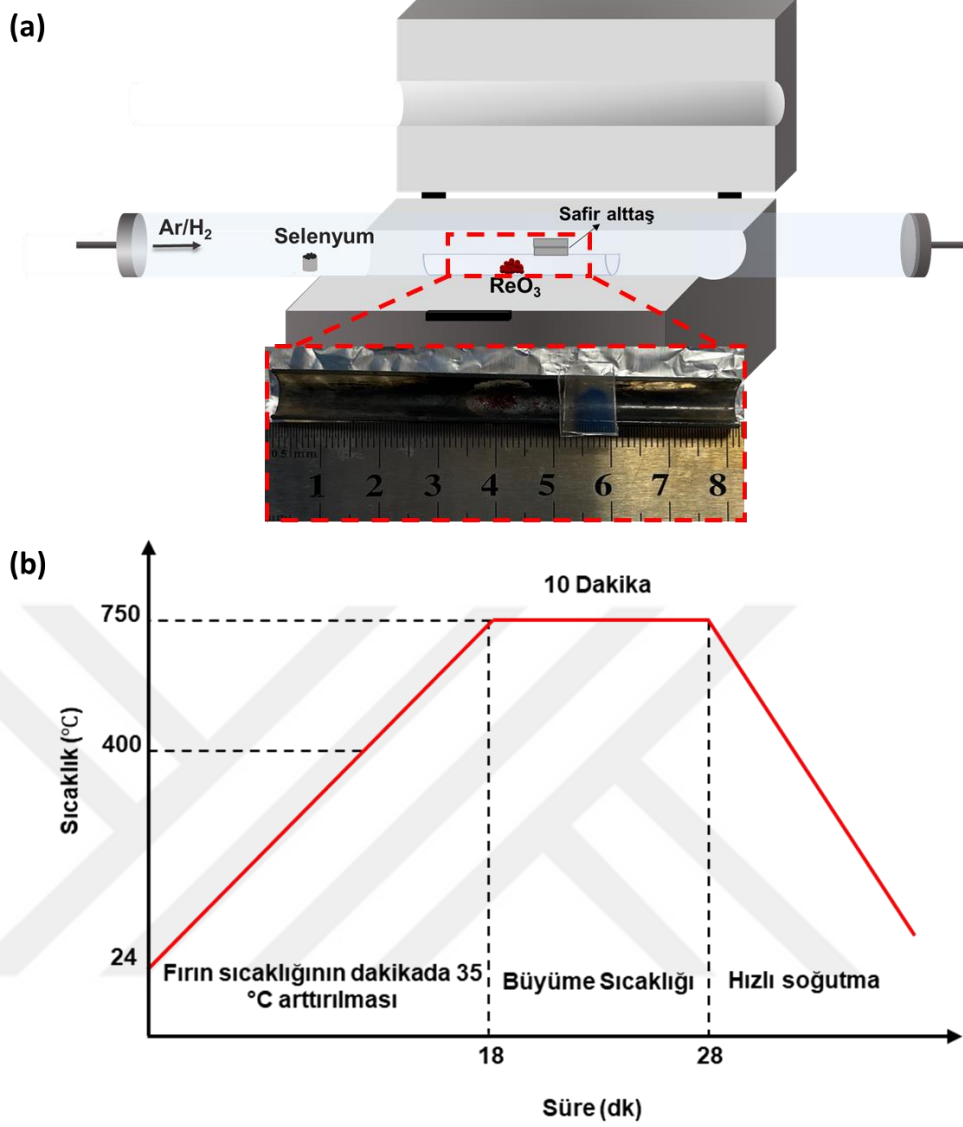
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen CVD deneyleri için Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YÜTAM) 2B malzeme araştırma laboratuvarında bulunan Şekil 17 (a, b)’deki tek ısıtma bölge CVD fırın kullanılmıştır. Tez kapsamındaki deneylerde büyüme sıcaklığı, altlık tipi, kalkojen sıcaklığı, taşıyıcı gaz miktarı, öncü toz miktarı ve büyüme süresi değiştirilerek aygıt fabrikasyonu için ihtiyaç duyulan boyut ve kalitede pulların tekrarlanabilir üretimi için ideal şartlar belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney esnasında gerekli ve yeterli miktarda kaynak malzemenin reaksiyona girebilmesi için geçiş metali ve kalkojenin uygun sıcaklıktaki konuma yerleştirilmeleri gerekmektedir. Öncülerin deney sırasında bulunması gereken uygun konumları belirleyebilmek maksadıyla fırın merkezinden itibaren 18,5 cm için her yarım santimde deney tüpü sıcaklığı ölçülmüş ve Şekil 17 (c)’de sunulan değerler elde edilmiştir.



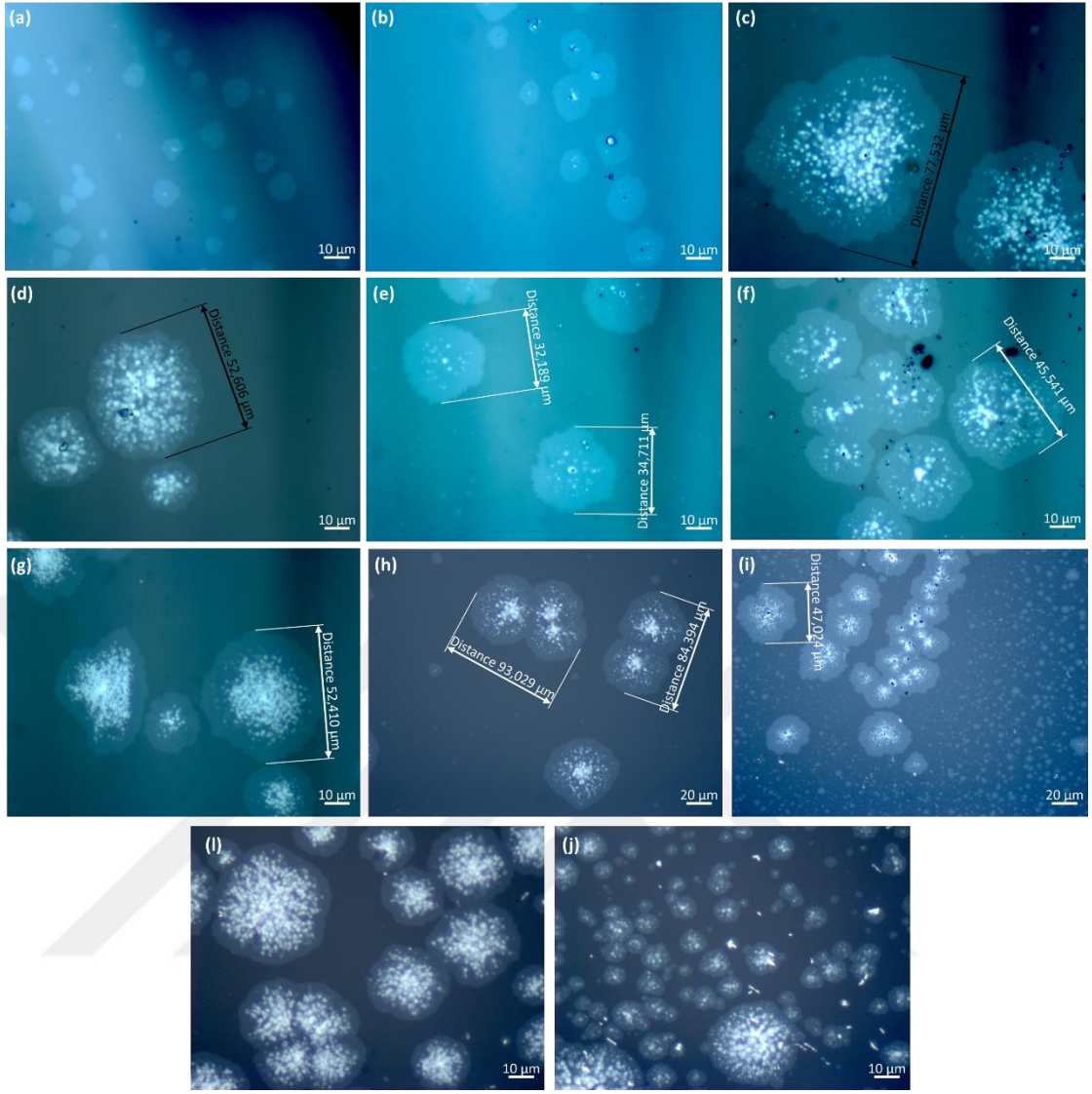
Şekil 17. (a) CVD deney düzeneği. (b) CVD fırın ısıtma bölgesi. (c) Deney tüpü sıcaklığının fırın merkezine uzaklığa bağlı değişimi.

2B ReSe₂ pul sentezi deneylerinde Şekil 18’de gösterilen CVD deney düzeneği ve sıcaklık rampası kullanılmıştır. ReO₃ (%99,9 saflıkta) ve Se (%99,9 saflıkta) öncü tozu kullanılan CVD deneyleri atmosferik basınç altında gerçekleştirilmiştir. NaCl (Sodyum Klorür), ReO₃ ve Safir alttaş iki ucu açık kuvars pota üzerine Şekil 18 (a)’da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 18. (a) CVD deney düzeneğinin şematığı. (b) Deney süresince fırın merkez sıcaklığının değişimi.

Aygıt üretimi için uygun boyut ve kalitede pul elde etmek amacıyla Se'un fırın merkezine uzaklığı 16,5 cm, ReO_3 miktarı 3 mg, NaCl miktarı 0,5 mg, taşıyıcı gazlar 62,25 sccm Ar/2,25 sccm H_2 , Deney süresi 5 dk olarak ayarlanmış ve Şekil 19 (a)'da sunulan optik mikroskop (OM) görüntüleri sunulan yapılar elde edilmiştir.



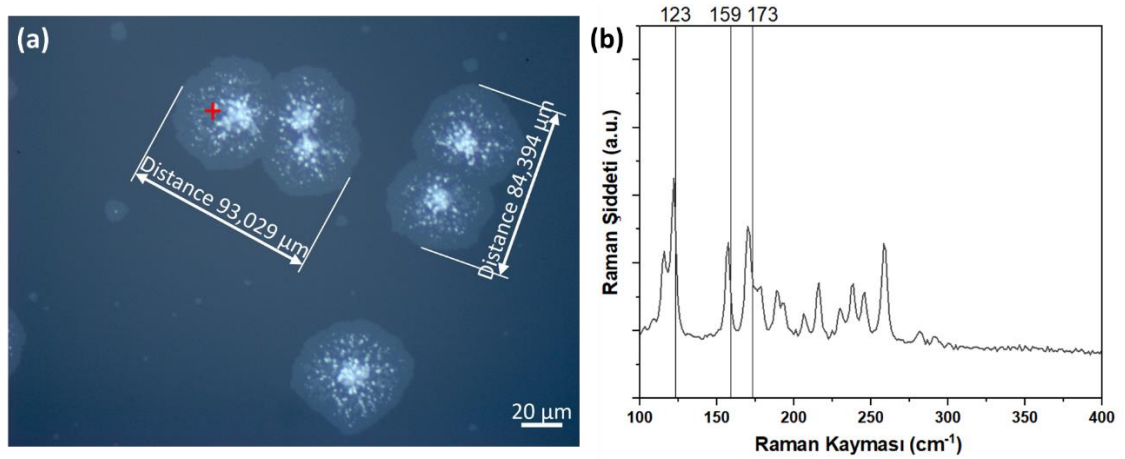
Şekil 19. (a) Se'un fırın merkezine uzaklığı 16,5 cm ayarlandığında, (b) safir mikoreaktör kullanıldığında, (c) deney tüpü cam yünü ile sarıldığında, (d) deney süresi 8 dakika yapıldığında ve deney tüpü (e) 750 °C ve (f) 450 °C'de sürüldüğünde, (g) sıcaklık rampası 25°C/dk olarak ayarlandığında, (h) H₂ 1,5 sccm'e düşürülüp deney süresi 10 dk'ya çıkarıldığında, (i) H₂ 1 sccm'e düşürüldüğünde, (j) H₂ 2 sccm'e düşürüldüğünde, (k) H₂ 2,25 sccm'e çıkarıldığında elde edilen OM görüntüleri.

Ölçeklenebilir ve kontrollü ReSe₂ sentezi için safir atıklar üst üste istiflenerek safir mikoreaktör oluşturulmuş ve bu mikoreaktör kullanılarak yapılan deneyde Şekil 19 (b)'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Deney tüpünün fırın dışında kalan kısmı cam yünü ile sarılmış ve böylece dış ortamla yalıtımının sağlanması amaçlanmıştır. Cam yünü dahil edilerek yapılan deney sonucunda Şekil 19 (c)'de sunulan yapılar elde edilmiştir. Yanal boyutun ciddi oranda arttığı ancak pul yüzeyinde gözlemlenen parlak noktalar

nedeniyle pul kalınlıklarının homojen olmadığı düşünülmektedir. Pul yüzeylerini temizlemek amacıyla deney süresi 5 dakikadan 8 dakikaya çıkarılmış ve Şekil 19 (d)'de sunulan pul yapıları elde edilmiştir. Yapıların yüzeyinde hala yoğun parlak noktalar olduğu görülmektedir.

Reaksiyon alanına kontrollü biçimde Selenyum gönderilebilirse büyümenin de daha kontrollü olacağı düşünülmektedir. Bu sebeple Selenyum, deney başlayana kadar fırın merkezinden 19 cm uzakta tutulmuş ve deney başladığı anda (750 °C) fırın merkezine 3 cm yaklaştırılmıştır. Deney sonucunda Şekil 19 (e)'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Reaksiyon sırasında ReO_3 'ün reaktif bileşeni olan Re_2O_7 400 °C'de oluşmaktadır (Li et al., 2016). ReO_3 ve Selenyum'un aynı anda buharlaşması ve verimli biçimde reaksiyona girebilmesi amacıyla deney tüpü 450 °C'de sürülmüş ve Şekil 19 (f)'de sunulan pul yapıları elde edilmiştir. Pul boyutları iyileştirilebilmiş ancak parlak nokta benzeri kirlilikler temizlenememiştir. Daha sonraki deneylerde ise sıcaklık rampası 25°C/dk olarak ayarlanarak, H_2 1,5 sccm'e düşürülüp deney süresi 10 dk'ya çıkarılarak, H_2 1 sccm'e düşürülerek, H_2 2 sccm'e düşürülerek ve H_2 tekrar 2,25 sccm'e çıkarılarak deneyler yapılmış ve Şekil 19 (g, h, i, j ve k)'de sunulan OM görüntüleri elde edilmiştir.

Elde edilen OM görüntüleri incelendiğinde, Şekil 19 (d)'de sunulan yapıların diğerlerine kıyasla daha geniş yanal alana ve daha az parlak noktaya sahip olduğu görülmüştür. İlgili deneyde Se'un fırın merkezine uzaklığı 16 cm, ReO_3 miktarı 3 mg, NaCl miktarı 0,5 mg, taşıyıcı gazlar 60 sccm Ar/1,5 sccm H_2 , deney süresi 10 dk olarak ayarlanmış ve ReO_3 ile Selenyum'un aynı anda buharlaşması ve verimli biçimde reaksiyona girebilmesi amacıyla deney tüpü 450 °C'de sürülmüştür. Üretilen bu 2B ReSe_2 tabakalarının varlığını doğrulamak ve kristal kaliteleri hakkında bilgi edinmek amacıyla Raman spektrumu ölçülmüş ve Şekil 20 (b)'de sunulan Raman pikleri elde edilmiştir. Raman ölçümleri 532 nm dalga boyunda ve 3 mW güçte lazer ışığı kullanılarak yapılmıştır.

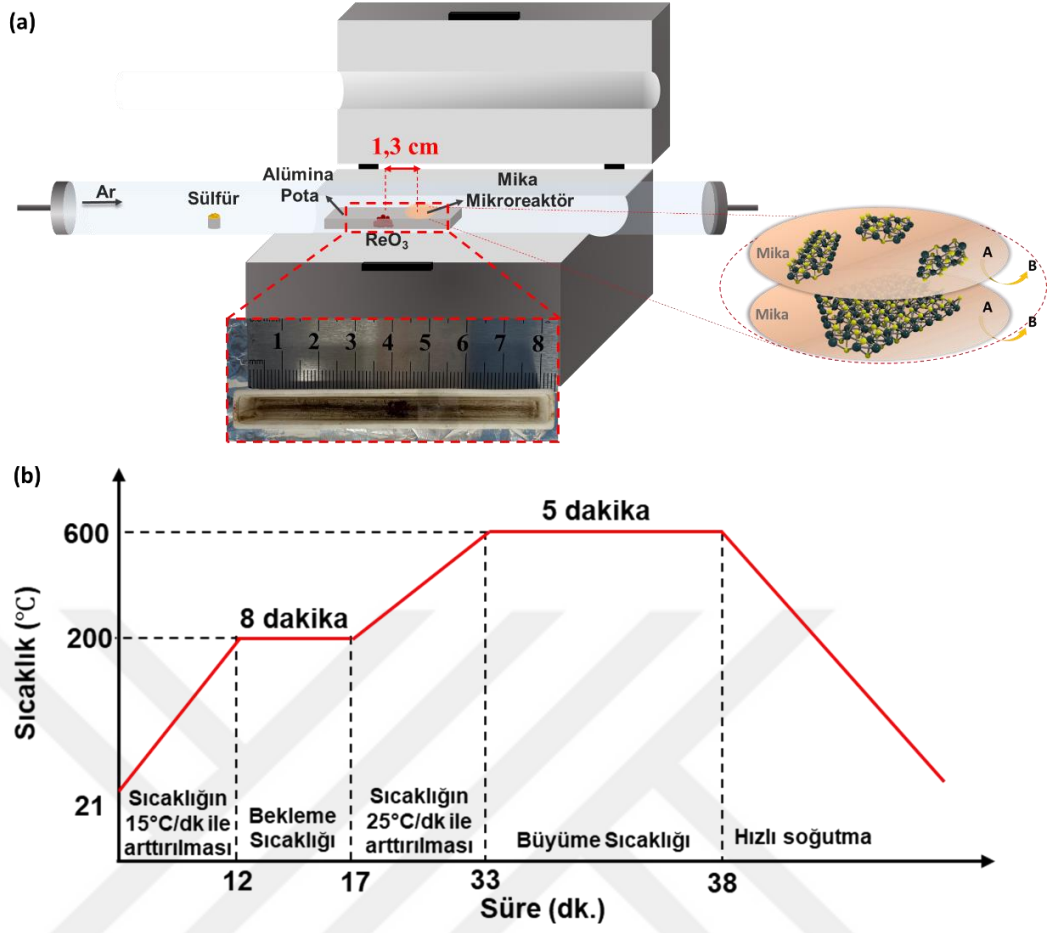


Şekil 20. (a)'da sunulan yapılar için ölçülen (b) Raman spektrumu.

Şekil 20 (b)'de sunulan Raman spektrumu incelendiğinde üretilen pullar için literatür ile uyumlu Raman piklerinin elde edildiği görülmüştür. ReSe₂'nin düşük kristal simetrisi ve düzlem içi ve düzlem dışı Raman modlarının yanı sıra bu Raman modlarının birbirleriyle ve akustik fononlar ile etkileşimi nedeniyle çok sayıda Raman piki elde edilmiştir. ReSe₂'nin, 100-300 cm⁻¹ aralığında ondan fazla farklı Raman modu oluşmaktadır. Bunlardan ikisi ReSe₂'nin düzlem içi ve dışı titreşim modlarına karşılık gelen ~123 cm⁻¹ (E_g^{raman}) ve ~173 cm⁻¹ (A_g) konumlu piklerdir (Hafeez et al., 2016; Xie et al., 2019; Mathew et al., 2022).

3.3. ReS₂ Pullarının CVD Metodu ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında ReSe₂ deneylerine ek olarak, aygıt fabrikasyonunda kullanılacak boyut ve kalitede 2B ReS₂ tabakalarının sentezi için deneyler gerçekleştirilmiştir. 2B ReS₂ sentez deneylerinde Renyum kaynağı olarak ReO₃ öncü tozu (%99,9 saflıkta), Sülfür kaynağı olarak Sülfür tozu (%99,9 saflıkta) kullanılmış ve deneyler, Şekil 21 (a)'da sunulan CVD düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Öncü konsantrasyonunu azaltarak, çekirdeklenme yoğunluğu ve büyüme hızının kontrol altına alınması için Şekil 21'deki gibi iki altlık üstü üste istiflenerek reaksiyon alanını sınırlayan bir mikrореактör inşa edilmiştir. Mikrореактör vasıtasıyla elde edilen sınırlı reaksiyon alanı, öncü konsantrasyonunu azaltarak, çekirdeklenme yoğunluğu ve büyüme hızının kontrol altına alınmasını ve bu sayede Şekil 21 (a)'da görüldüğü gibi altlıkların A yüzeylerinde düzensiz yapılar elde edilirken, B yüzeylerinde tek katmanlı, geniş alanlı ReS₂ pullarının elde edilebilmesini sağlamaktadır (Cui et al., 2017; Huang et al., 2017).

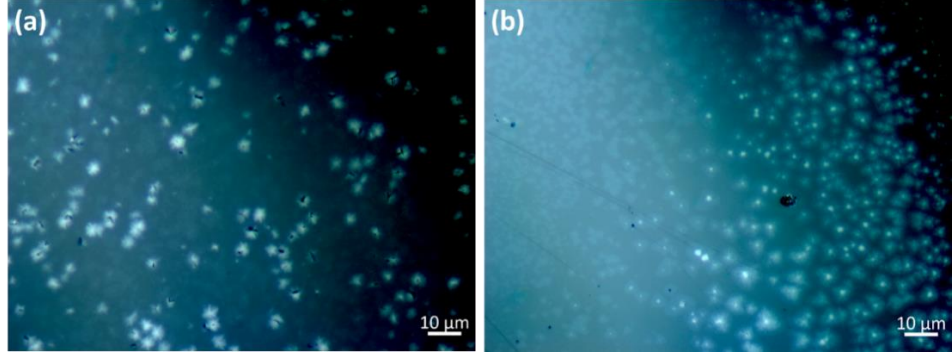


Şekil 21. (a) CVD deney düzeneği şematığı. 2B malzemenin mikoreaktör içinde ve dışındaki büyüme davranışının gösterimi. (b) Deney süresince fırın merkez sıcaklığının değişimi.

Gerçekleştirilen ReS_2 sentez deneylerinde fırın sıcaklığı Şekil 21 (b)'deki gibi dakikada 25°C artarak deney sıcaklığı olan 600°C 'ye çıkarılmış ve burada reaksiyonun tamamlanması için 3 dakika beklenmiştir. Deneylerde alttaş olarak taze kesilmiş (freshly cleaved) ve tavllanmış mikalar kullanılmıştır. Ayrıca, Sulfür deney başlayana kadar fırın merkezinden 26 cm uzakta tutulmuş ve fırın merkez sıcaklığı 600°C olduğu an 19,5 cm'e kaydırılmıştır. Argon taşıyıcı gaz akış hızı büyüme sıcaklığı olan 600°C 'ye kadar 80 sccm ve deney başladığında ise 40 sccm olacak şekilde ayarlanmıştır.

Deney öncesinde, taze kesilmiş mikaların yüzeyindeki K^+ iyonlarını gidermek ve çekirdeklenme alanlarının sayısını azaltmak amacıyla altlıklar tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Tavlama işlemi, taze kesilmiş Muskovit mikalar normal atmosfer şartlarında sıcak tabakta ve 80 sccm Argon taşıyıcı gazı kullanılarak CVD fırında 400°C sıcaklıkta yarım saat bekletilerek yapılmıştır. Kullanılan CVD fırın düzeneğinde oksijen taşıyıcı

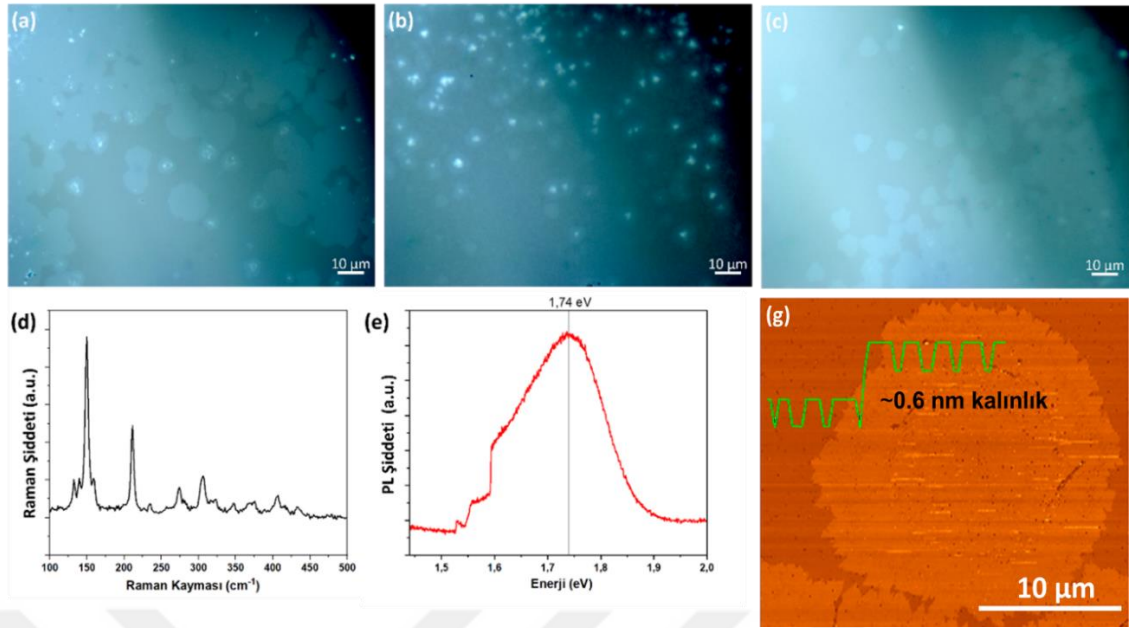
gazı olmadığı için Ar gazı kullanılmıştır. Kullanılan Ar gazının K^+ iyonlarını taşıyıp altlıktan uzaklaştırması amaçlanmıştır. İki farklı yöntem ile tavlanan mikalar kullanılarak aynı parametreler ile deney yapılmış ve tavlama yöntemleri kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda Şekil 22’de sunulan OM görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 22. (a) Hava ortamında ve (b) Argon atmosferinde tavlanan mikalar için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri (S’ün fırın merkezine uzaklığı 19,5 cm, ReO_3 Miktarı 6 mg, 80/40 sccm Ar, Büyüme sıcaklığı $600^\circ C$, Deney süresi 5 dk).

80 sccm Argon taşıyıcı gazı kullanılarak tavlanan mikalar ile elde edilen sonuçların hava ortamında tavlanan mikalara kıyasla daha iyi olduğu görülmüş ve sonraki deneylerde mikalar deney öncesinde 80 sccm Ar taşıyıcı gazı ile tavlannmıştır.

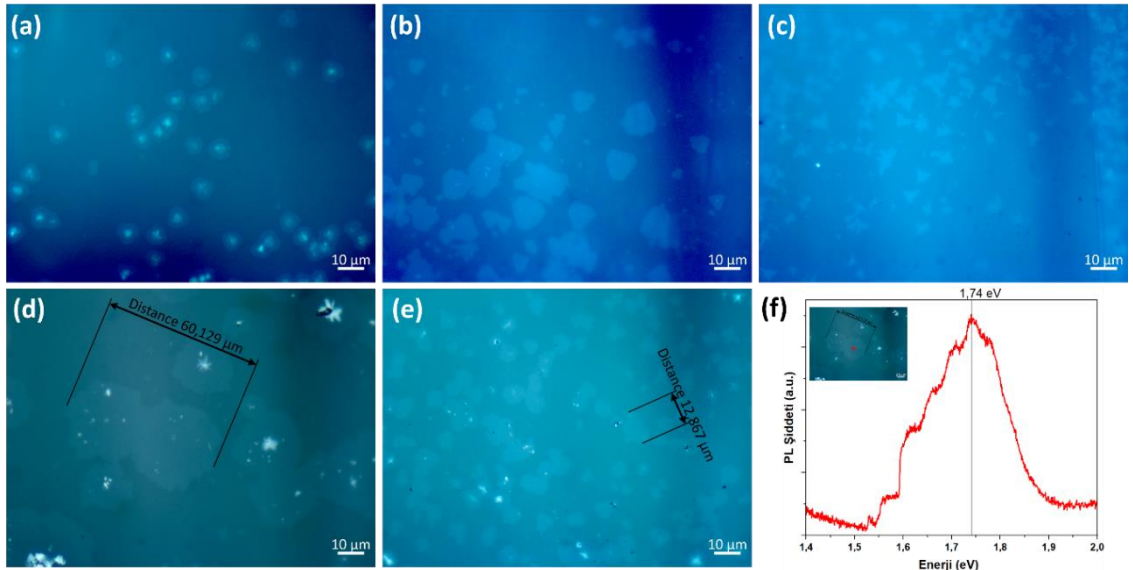
Re_2O_7 ’nin sebep olabileceği aşırı çekirdeklenmeyi ve düzlem dışı büyümeyi önlemek amacıyla ReO_3 miktarı 3 mg’a düşürülmüştür (Li et al., 2016). Ayrıca, Sülfür fırın merkezine 1 cm yaklaştırılmıştır. Altlık olarak ise sarkan bağ içermeyen yüzeyi sayesinde kristal büyümesi için ideal altlık olarak görülen taze kesilmiş ve tavlannmış Floroflogopit mika kullanılmıştır. Yapılan deney sonucunda Şekil 23 (a, b ve c)’de sunulan OM görüntüleri elde edilmiştir. Yapılan deneyde öncü toza (ReO_3) uzaklığı sırasıyla 1, 2,5 ve 5 cm olan üç mikroreaktör yerleştirilmiştir.



Şekil 23. (a) Birinci mikroyeaktör, (b) ikinci mikroyeaktör ve (c) üçüncü mikroyeaktör için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri. (a)'da sunulan yapılar için ölçülen (d) Raman spektrumu, (e) PL spektrumu ve (f) AFM ölçümü (S'ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO_3 Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Büyüme sıcaklığı 600°C , Deney süresi 5 dk).

Şekil 23 (a, b ve c)'den görüldüğü üzere, öncü toza en yakın olan altlıkta diğerlerine kıyasla yanal alanı daha büyük pullar elde edilmiştir. Ayrıca, yine birinci mikroyeaktörde elde edilen yapıların altıgen forma benzer olduğu görülmüştür. Diğer mikroyeaktörlerde ise üçgen benzeri yapılar elde edildiği görülmüştür. Birinci mikroyeaktörde elde edilen altıgen benzeri yapıların Şekil 23 (d)'de sunulan Raman ölçümleri incelendiğinde 132 , 139 , 150 , 158 , 211 , 234 , 274 ve 305 cm^{-1} konumlu literatür ile uyuşan karakteristik Raman pikleri gözlemlenmiştir. 132 cm^{-1} ve 139 cm^{-1} konumlu tepe noktası düzlem dışı A_g moduna diğer modlar ise düzlem içi E_g^{raman} moda karşılık gelmektedir (Li et al., 2016). Üretilen ReS_2 pullarının oda sıcaklığında fotoluminesans (PL) ölçümü yapılmış ve Şekil 23 (e)'den görüldüğü üzere yaklaşık $1,74\text{ eV}$ 'da PL piki elde edilmiştir. Raman ve PL ölçümleri 532 nm dalga boyunda ve 3 mW güçte lazer ışığı kullanılarak yapılmıştır.

Pulların kalınlıkları ise Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Şekil 23 (f)'de gösterildiği gibi $0,6\text{ nm}$ ölçülmüştür. PL ve AFM ölçümleri literatür ile karşılaştırılarak Şekil 23 (a)'da sunulan pulların tek tabaka olduğu ispatlanmıştır (Sun et al., 2023). Farklı büyüme sıcaklıkları için ise Şekil 24'te sunulan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 24. (a) 550°C, (b) 575 °C, (c) 625 °C, (d) 650 °C ve (e) 675°C büyüme sıcaklığı için elde edilen deney sonuçlarının OM görüntüleri (S’ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO₃ Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Deney süresi 5 dk). (f) PL spektrumu ölçümü.

Şekil 24 (d)’de sunulan 650 °C büyüme sıcaklığı için ~30-60 µm aralığındaki boyutlarda pullar elde edilmiştir. Üretilen ReS₂ pullarının oda sıcaklığında PL ölçümü yapılmış ve Şekil 24 (f)’den görüldüğü üzere yaklaşık 1,74 eV’da PL piki elde edilmiştir. Ancak, elde edilen pul yapılarının üzerindeki parlak noktalar sebebiyle pul kalınlığının homojen olmadığı düşünülmektedir. Pul yüzeyindeki parlak noktaları temizlemek ve pul şeklini tek bir altıgen haline getirmek amacıyla deneyler yapılmaya devam edilmiştir.

Gaz fazındaki Re ve S’ün konsantrasyonu ve hızı, gazın taşınma doğrultusu boyunca azalır. Bu nedenle altlık, ReO₃ öncü tozunun üzerine veya çok yakınına yerleştirildiğinde düzlem dışı büyüme gözlemlenir. Bu düzlem dışı büyüme, küçük ve kalın pulların oluşmasına neden olur. Altlık ve öncü toz arasındaki mesafe çok fazla arttırıldığında ise siyah granüller ve küçük boyutlu 2B ReS₂ pulları sentezlenir. ReS₂’nin katmanlar arası bağlanma enerjisinin düşük olması, buhar fazında Re ve S kümelerini oluşturan düzlem dışı büyümeyi destekler. Gaz halindeki Re ve S’nin taşınma mesafesi ne kadar fazlaysa gaz halindeki Re ve S kümeleri de o kadar büyük olur. Sonuç olarak düzlem dışı büyüme ve düzlem içi büyüme aynı anda gerçekleşir ve hem küçük boyutlu ReS₂ pulları hem de ReS₂ nanoçiçekleri sentezlenir. Ancak, Re ve S türlerinin uygun konsantrasyonu ve hızı düzlem içi büyümeyi teşvik eder ve düzlem dışı büyümeyi bastırıp ReS₂ pullarının yanal boyutunun büyümesini sağlar (Guo et al., 2019). Bu düşünce

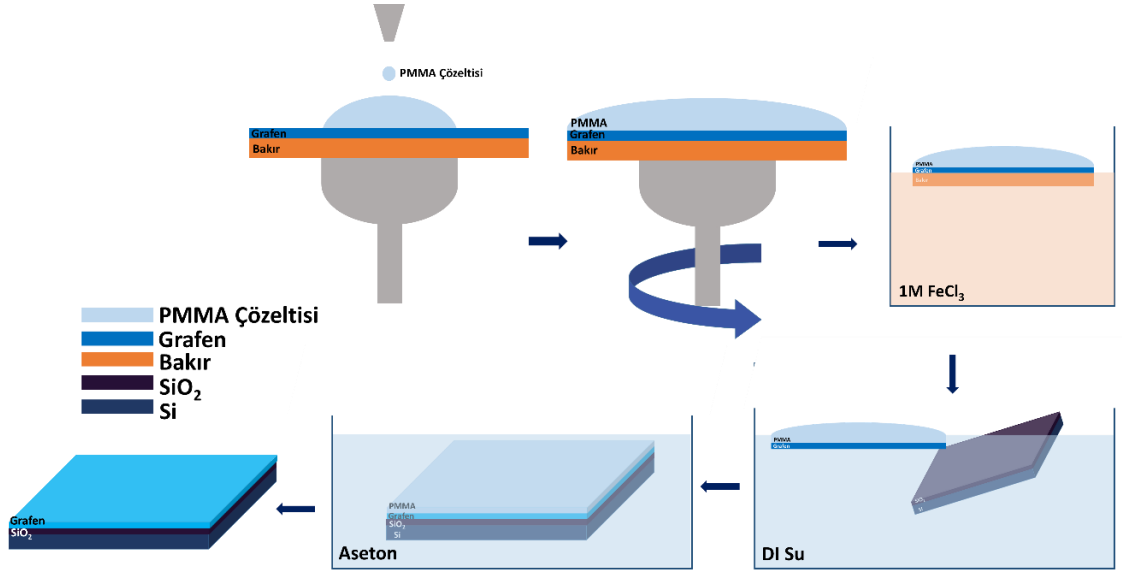
ışığında, altlık ve öncü toz arasındaki mesafe ayarlanarak ideal sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır ve yapılan deneyler sonucunda Şekil 25'te sunulan yapılar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde altlık öncü tozdan 1,5 cm uzaklaştırıldığında pul boyutunun arttığı görülmüştür.



Şekil 25. ReO₃ ve altlık arasındaki mesafe (a) 1,5 cm, (b) 2,5 (c) 0,5 cm olan deney için elde edilen OM görüntüleri (S'ün fırın merkezine uzaklığı 18,5 cm, ReO₃ Miktarı 3 mg, 80/40 sccm Ar, Deney süresi 5 dk, Büyüme sıcaklığı 600°C).

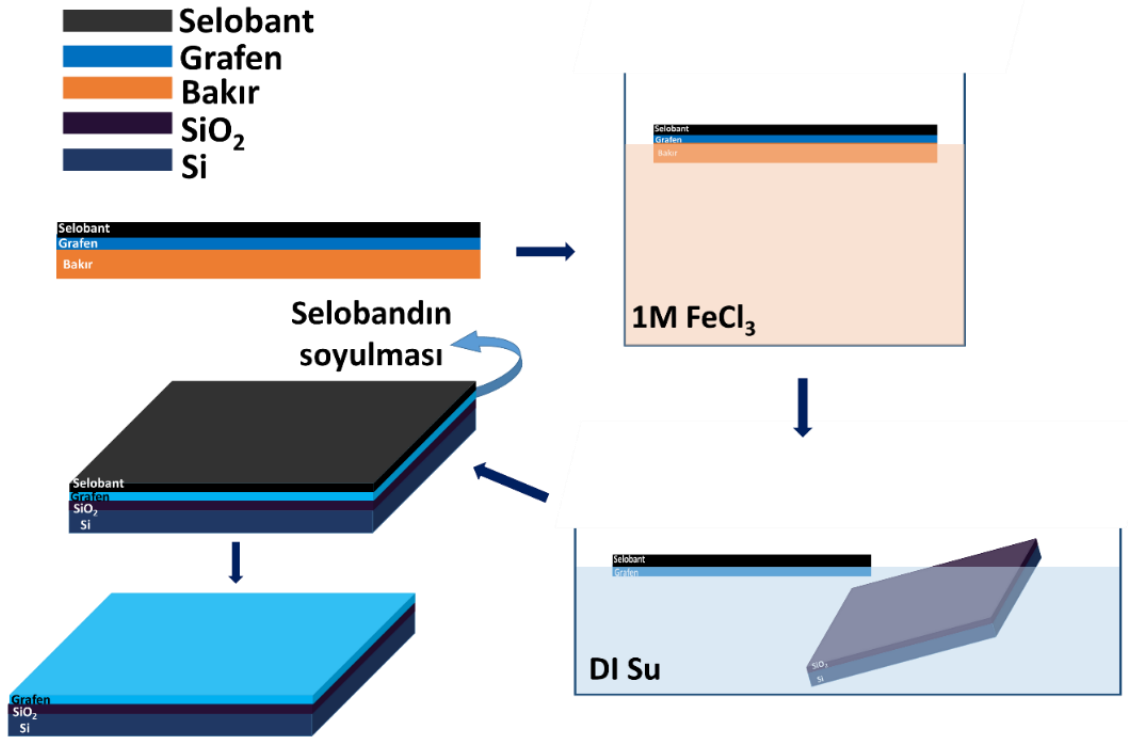
3.4. Grafen Filmin Desenlenmesi ve Transfer Süreci

Üretilen aygıt yapısındaki Grafen elektrotlar ticari olarak satın alınan bakır üzerine CVD ile büyütülmüş Grafen filmlerden elde edilmiştir. Literatürde 2B malzemelerin ıslak transferinde taşıyıcı polimer olarak genellikle PMMA kullanılmaktadır (Kim et al., 2020). Ancak, 2017 yılında yapılan bir çalışmada selobant (scotch tape) ile aktarılan Grafen filmlerin PMMA ile aktarılanlardan daha temiz, daha sürekli, daha az katkılı ve daha kaliteli olduğu aktarılmıştır (Zhu et al., 2017). Bu nedenle, tez çalışması kapsamında Grafen filmler için her iki yöntem (selobant ve PMMA destekli ıslak transfer) de uygulanmıştır ve karşılaştırılmıştır. PMMA destekli ıslak transfer yöntemi için uygulanan temel adımlar Şekil 26'da sunulmuştur.



Şekil 26. PMMA destekli ıslak transfer sürecinin temel adımları.

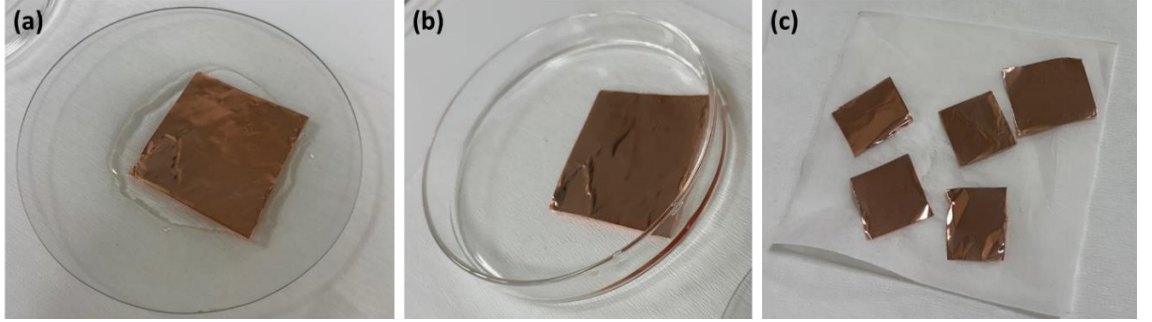
Selobant ile transferi gerçekleştirilen numunenin işlem adımları ise Şekil 27’de sunulmuştur.



Şekil 27. Selobant destekli ıslak transfer sürecinin temel adımları.

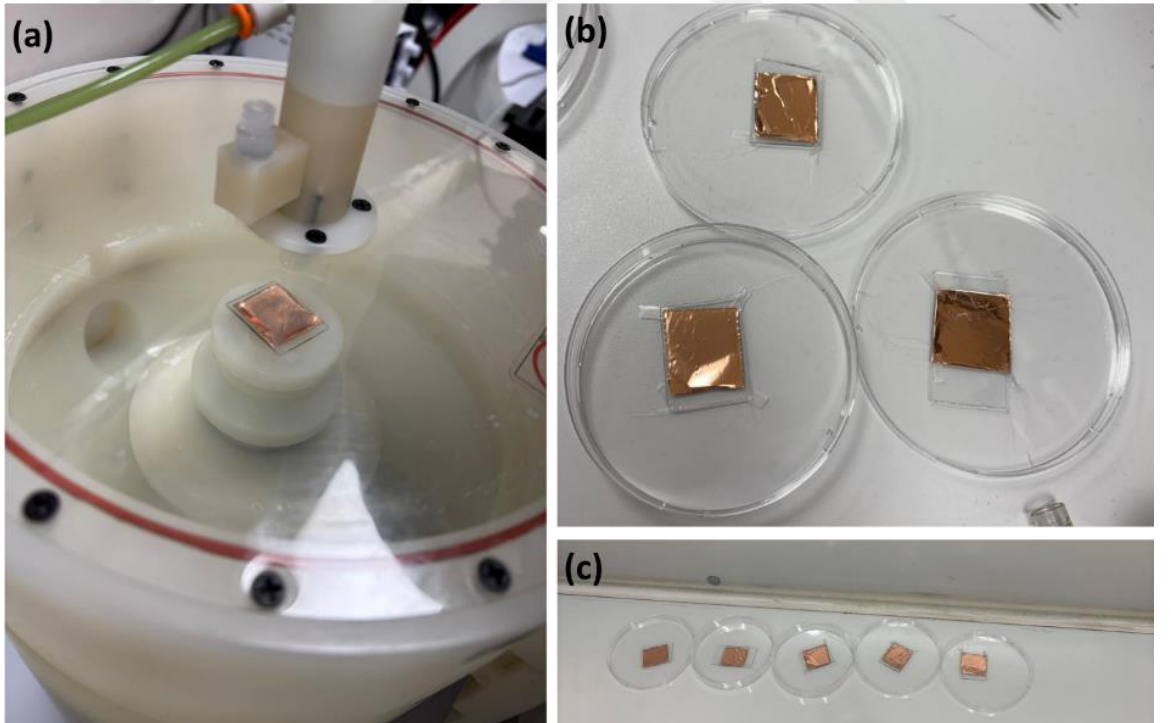
Transfer işleminde ilk olarak bakırın arka yüzeyindeki Grafen kalıntılarını gidermek amacıyla CVD ile bakır (Cu) üzerine büyütülmüş Grafen film 2 mL %65’luk

Nitrik asit ve 6 mL DI su karışımında Şekil 28'deki gibi 3 dk yüzdürülmüştür. Numune daha sonra 1 dakika DI suda durulanmıştır.



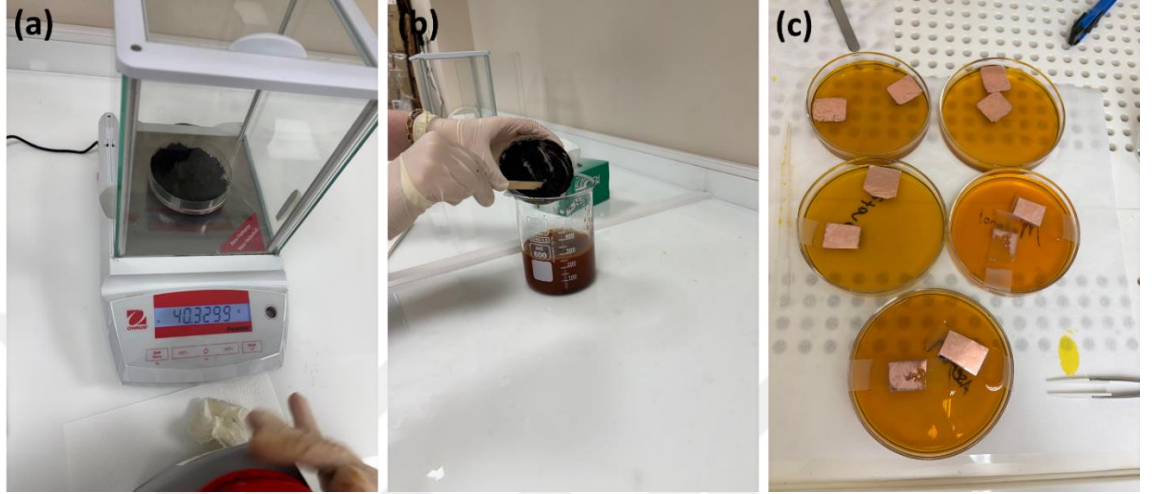
Şekil 28. (a) Grafen/Cu numunesinin Nitrik asit çözeltisinde yüzdürülmesi. (b) Numunenin DI su ile durulanması. (c) Numunenin tozsuz peçete üstünde kurumaya bırakılması ve uygun boyutlarda kesilmesi.

Kurutulup uygun boyutlarda kesilen Grafen/Cu numunelerinin bir kısmı %4'lük PMMA çözeltisi numune üzerine damlatılıp döndürerek kaplanmıştır. PMMA kaplanan numuneler 12 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. İşlem adımları Şekil 29'da gösterilmiştir.



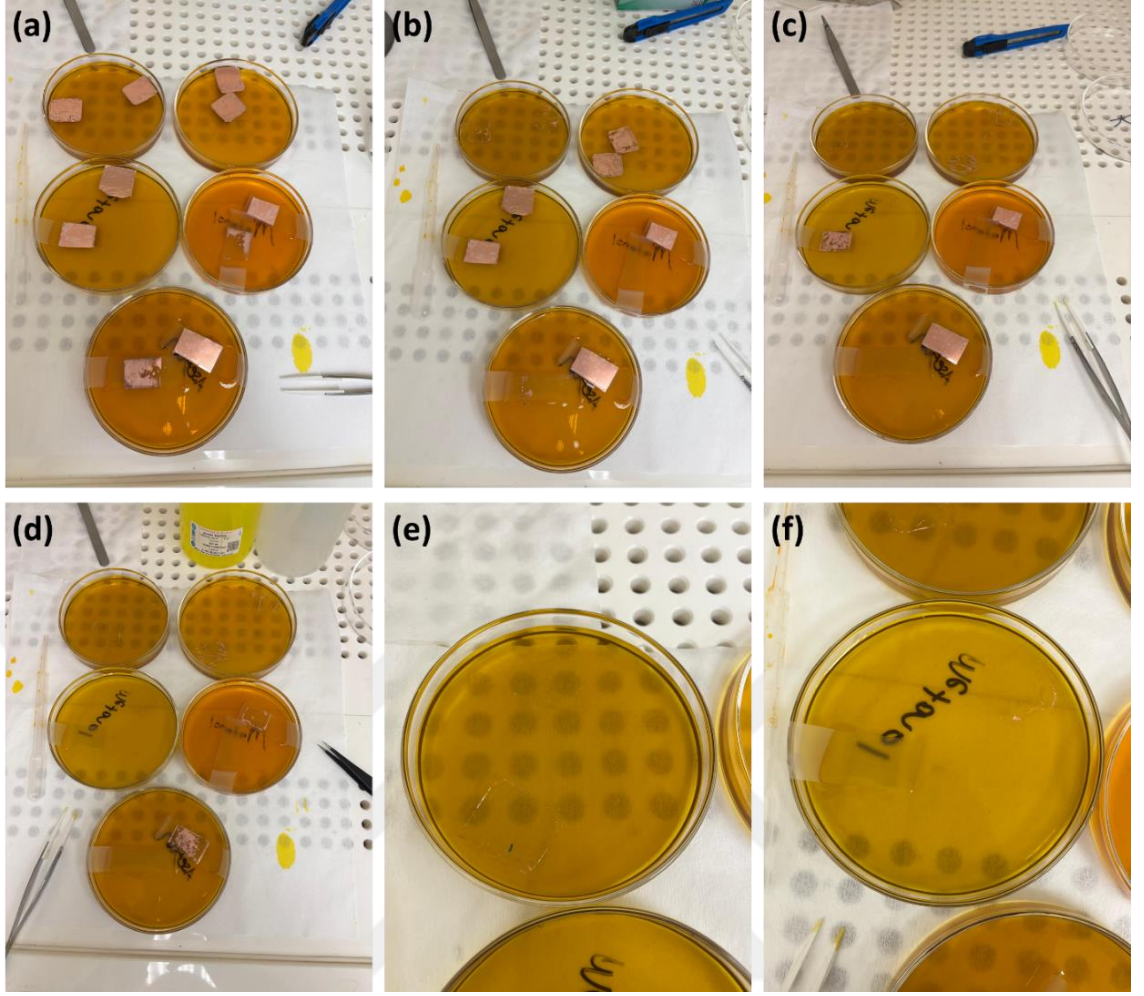
Şekil 29. (a) PMMA çözeltisi ile numune yüzeyinin döndürülerek kaplanması. (b,c) PMMA çözeltisi ile kaplanıp 12 saat kurumaya bırakılan numuneler.

Kalan numunelerin üzerine selobant yapıştırılmıştır. PMMA ile kaplanan ve bant yapıştırılan numunelerden bakır altlığı uzaklaştırmak için 0,5 M FeCl_3 (Ferrik Klorit asit) çözeltisi hazırlanmıştır. Numuneler, FeCl_3 çözeltisinde yüzdürülerek bakır aşındırılmıştır. FeCl_3 çözeltisinin hazırlık aşamaları ve numunelerin FeCl_3 çözeltisinde yüzdürülmesi Şekil 30'da gösterilmiştir.



Şekil 30. (a) FeCl_3 tozunun tartılması. (b) FeCl_3 tozunun DI su ile karıştırılması. (c) PMMA/Grafen/Cu ve Bant/Grafen/Cu numunelerinin FeCl_3 çözeltisinde yüzdürülmesi.

Bakır aşındıktan sonra kalıntı kalmaması için numuneler 1 saat daha FeCl_3 çözeltisinde bırakılmıştır. Numunelerin bakır altlıklarının erime süreçleri Şekil 31'de gösterilmiştir.



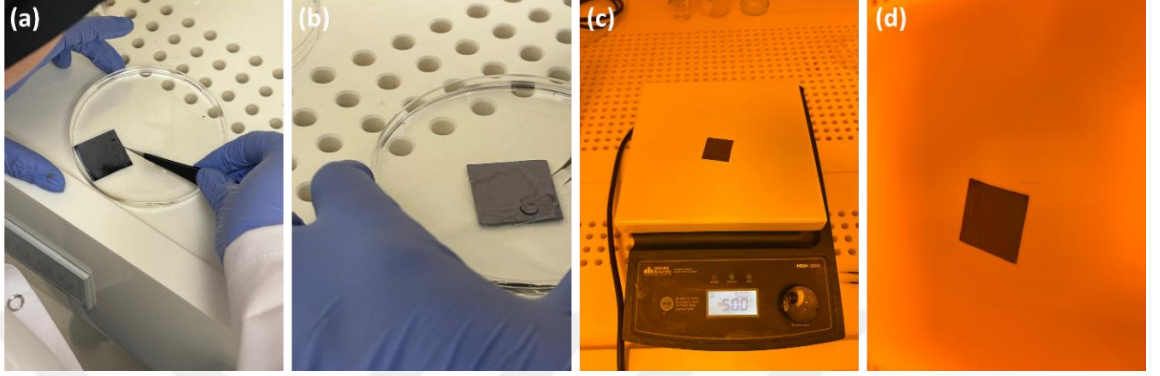
Şekil 31. Numunelerin bakır altlıklarının erime süreçleri.

Hedef alttaş olan $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$, sırasıyla asetonda 5 dk, metanolde 5 dk ve deiyonize suda 5 dk ultrasonik olarak yıkanmıştır. Daha sonra alttaşlar azot gazı ile kurutulmuş ve sıcak tabakta (hot plate) $120\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 dakika tavlanmıştır. $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ substratı, temizlik ve Grafen'in daha güçlü yapışması için plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (Plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) ile oksijen plazmaya maruz bırakılmıştır. Altlıkların yüzeylerinin aktifleştirilmesi için Tablo 3'te sunulan reçete kullanılmıştır.

Tablo 3. Altlıkların yüzeylerinin aktifleştirilmesi için kullanılan reçete.

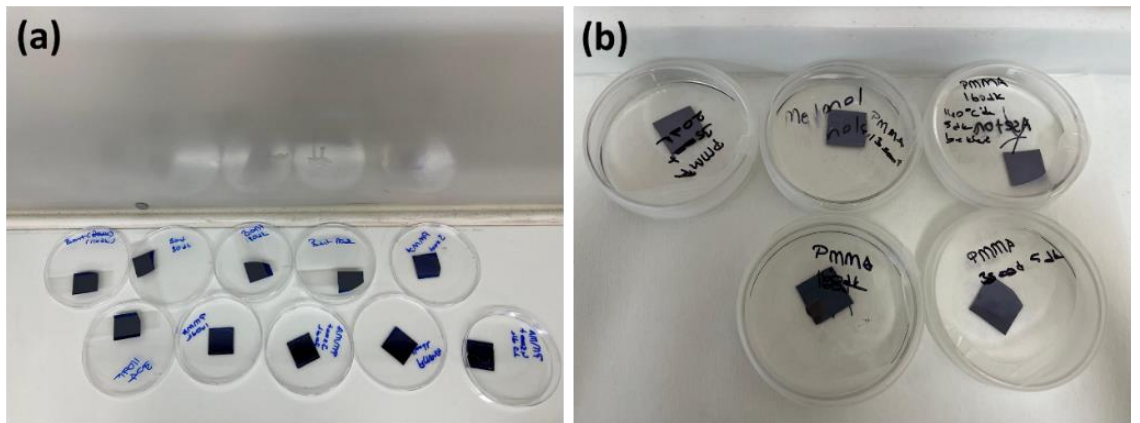
Parametre	Değer
İşlem süresi	30 saniye
Gaz (O_2)	30 sccm
Elektrot gücü	30 Watt

PMMA/Grafen ve Bant/Grafen numuneleri, $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ alttaşı transfer edilmeden önce DI su ile durulanmış ve daha sonra HCl çözeltisinde (2 ml %2'lik HCl asit ve 15 ml DI su) 10 dk yüzdürölüp FeCl_3 kalıntıları giderilmiştir. Numuneler bir kere daha DI su ile durulanmış ve hedef alttaşı transfer edilmiştir. Transfer edilen numuneler sırasıyla 50 °C ve 70 °C sıcaklıkta 10 dk tavlantıdır. İşlem adımları Şekil 32'de gösterilmiştir.



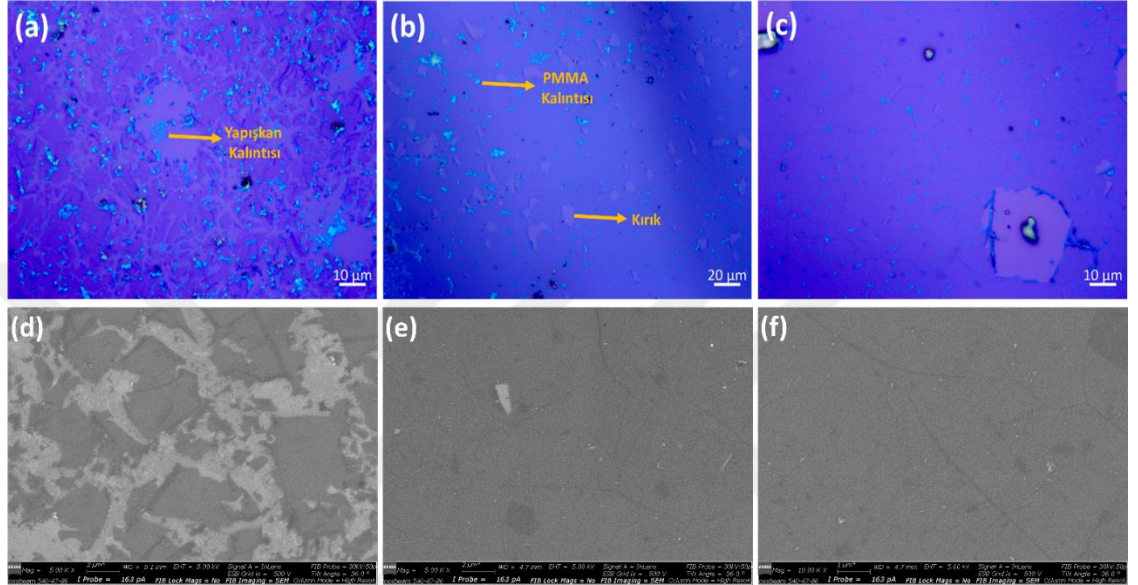
Şekil 32. (a, b) PMMA/Grafen ve Bant/Grafen numunelerinin, $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ alttaşı transfer edilmesi ve (c, d) numunelerin tavlantısı.

$\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ substrata transfer edilen PMMA/Grafen ve Bant/Grafen numuneleri Şekil 33 (a)'daki gibi kurumaya bırakılmıştır. 5 saat sonra Bant/Grafen/ $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ numunelerinden bantlar sökülüştür. PMMA/Grafen/ $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ numuneleri ise bir gece bekletilip sonrasında aseton içerisinde Şekil 33 (b)'deki gibi bekletilmiştir. Numuneler sonrasında izopropil alkol (IPA) ve DI su ile durulanmıştır. Daha sonra numuneler, 5 dk 70 °C sıcaklıkta tavlantıdır.



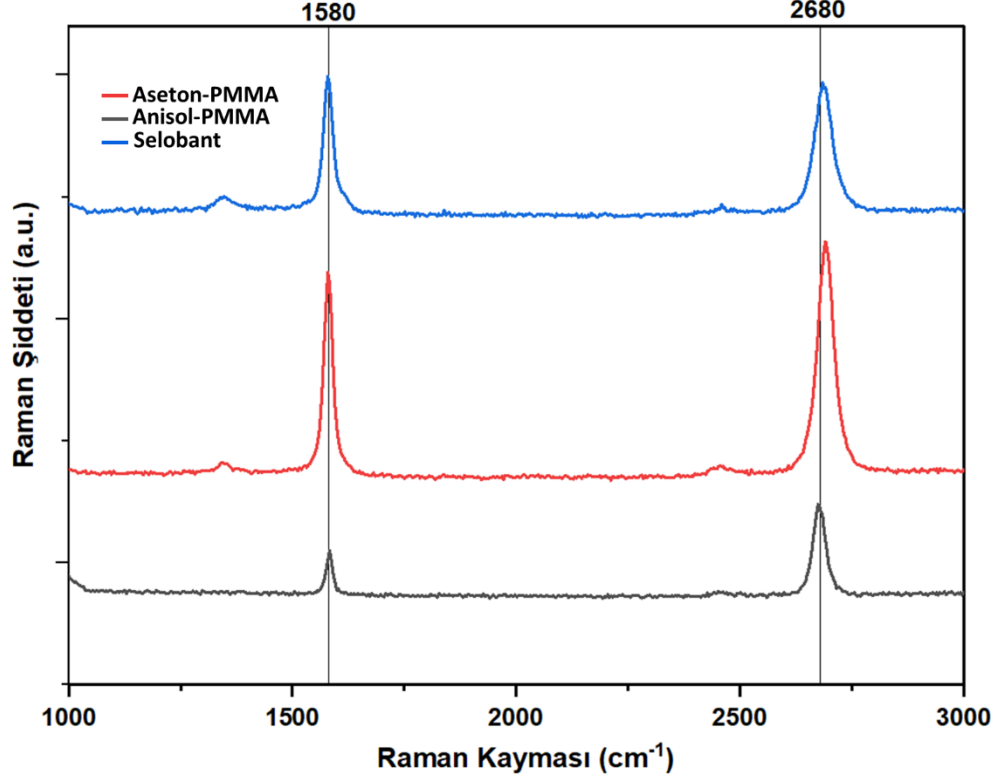
Şekil 33. (a) Çeker ocakta kurumaya bırakılan PMMA/Grafen/ $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ ve Bant/Grafen/ $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ numuneleri, (b) PMMA'nın uzaklaştırılması için aseton içinde bekletilen PMMA/Grafen/ $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ numuneler.

PMMA destekli ıslak transfer işleminde PMMA çözücüsü olarak kullanılan kimyasal kalıntı miktarını etkileyebilmektedir (Yang and Yan 2020). Bu bilginin ışığında kalıntıları azaltmak amacıyla PMMA çözücüsü olarak anisol kullanılmış, %4'lük iki PMMA çözeltisi hazırlanmıştır. Anisol ile hazırlanan Anisol çözeltisi ile de Grafen film transfer edilmiştir. Selobant, Aseton-PMMA ve Anisol-PMMA ile transfer edilen Grafen filmlerin OM ve SEM görüntüleri Şekil 34'teki gibidir.



Şekil 34. (a) Selobant, (b) Anisol-PMMA, (c) Aseton-PMMA ile transfer edilen numunelerin OM görüntüleri. (d) Selobant, (e) ve (f) Aseton-PMMA ile transfer edilen numunelerin SEM görüntüleri.

Şekil 34 incelendiğinde selobant ile aktarılan numunenin Anisol-PMMA ve Aseton-PMMA numunelerine kıyasla daha fazla kalıntı içerdiği ve Grafen filmin çok fazla kırıldığı görülmüştür. Aseton-PMMA numunesinin diğer iki yönteme kıyasla daha az kırık ve PMMA kalıntısı içerdiği görülmüştür. Transfer sırasında, anisol ile hazırlanan PMMA tabakasının daha yumuşak olduğu ve aktarım sırasında kolayca zarar görebildiği gözlemlenmiştir. Anisol-PMMA numunesinin daha fazla kırık içerme nedeninin bu olabileceği düşünülmektedir. Üç numunenin Raman ölçümleri alındığında ise Şekil 35'te sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Raman ölçümleri 1 mW güçte 532 nm dalga boyunda lazer ışığı kullanılarak yapılmıştır.

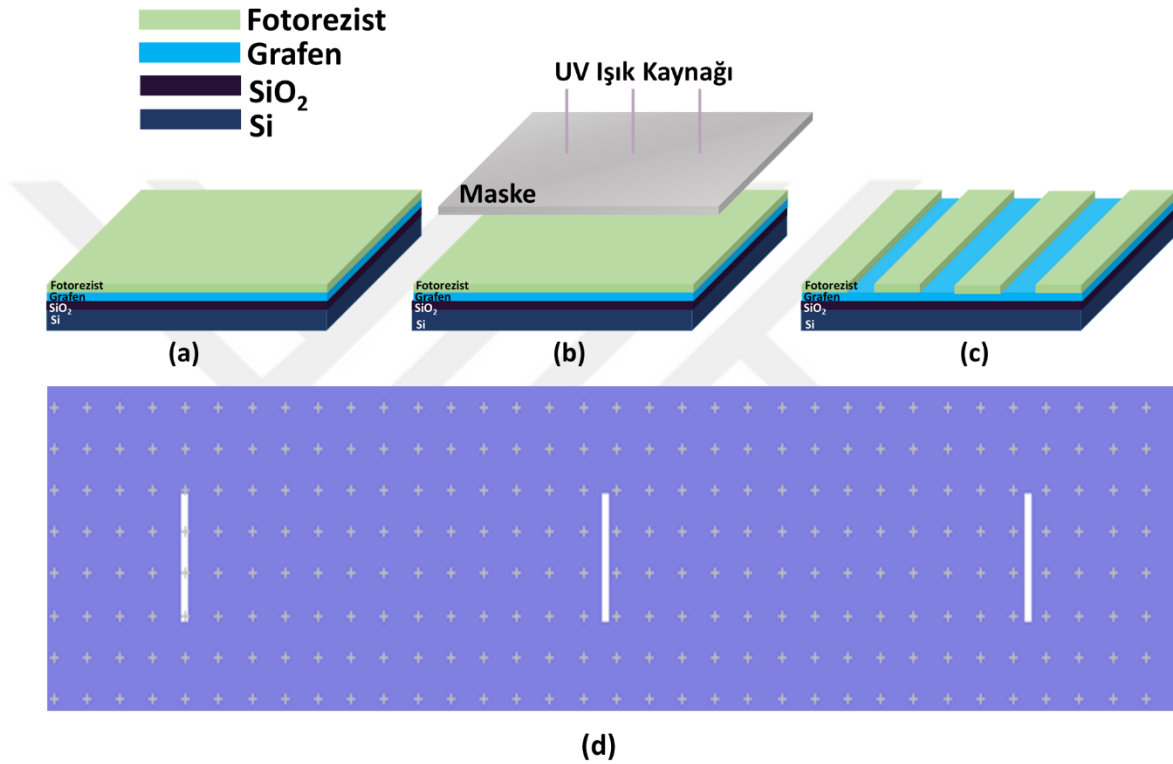


Şekil 35. Selobant, Anisol-PMMA ve Aseton-PMMA numunelerinin Raman spektrumları.

Grafen D ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$), G ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$) ve 2D ($\sim 2680 \text{ cm}^{-1}$) olarak adlandırılan üç ana pike sahiptir. D piki, Grafen'in kusur yapısını ifade etmekte ve yok denecek kadar zayıf olması, Grafen'in kusur yoğunluğunun çok düşük olduğunu göstermektedir (Li et al., 2023). Şekil 35 incelendiğinde, D pikinin numunelerde ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Ancak, selobant numune için pikin nispeten daha belirgin olması numunenin diğerlerine kıyasla daha kusurlu yapıda olduğunu göstermektedir. G piki Grafen, grafit ve karbon nanotüplerde görülen tipik bir piktir ve yapıdaki karbon bağlarını doğrulamaktadır (Ni et al., 2008; Li et al., 2023; Paton et al., 2023). 2D piki ise Grafen tabakalarının katman kalınlığı hakkında bilgi vermektedir (Li et al., 2023). Dar, keskin ve şiddetli 2D pikleri Grafen tabakalarının tek veya iki tabakalı olduğunu göstermektedir. Şekil 35 incelendiğinde Anisol-PMMA ile hazırlanan numunenin diğerlerine kıyasla daha kalın olduğu görülmektedir. Bunun transfer sırasında oluşan katlanmalardan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Aseton-PMMA ile hazırlanan numunenin Raman ölçümleri incelendiğinde, diğerlerine kıyasla kusur yoğunluğunun ihmal edilebilecek seviyede olduğu ve yaklaşık tek tabakalı olduğu anlaşılmaktadır. Aseton-PMMA ile hazırlanan

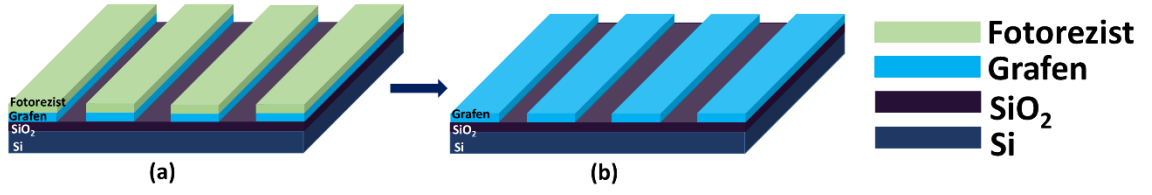
numunenin OM görüntüleri diğer numunelerle karşılaştırıldığında daha temiz ve sürekli film oluştuğu gözlemlenmektedir.

SiO₂/p-Si alttaş üzerine transfer edilen Grafen filmler, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde fotolitografi ve Endüktif Bağlı Plazma Aşındırma (ICP-RIE) ile ~40 µm genişliğe sahip şeritler halinde desenlenmiştir. Litografi işlemi için uygulanan adımlar Şekil 36'da sunulmuştur. Grafen numunelerinin litografi işleminde Şekil 36 (d)'de sunulan maske kullanılmıştır.



Şekil 36. (a) Alttaş, fotorezist ile döndürülerek kaplanmış ve (b) AZ 1505 Fotorezist kaplanan numune litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. (c) Pozlandırılan numune banyo (develop) edilmiştir. (d) Grafen numuneleri için litografi işleminde kullanılan maske tasarımı.

Grafen tabakası, ICP-RIE ile aşındırılarak Şekil 37 (a)'da gösterildiği gibi desenlenmiştir. Numune, yüzeyinde kalan fotorezisti kaldırmak (Lift off) için aseton içinde bekletiletilmiştir. Daha sonra DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. Sonuç olarak, Grafen elektrotlar Şekil 37 (b)'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



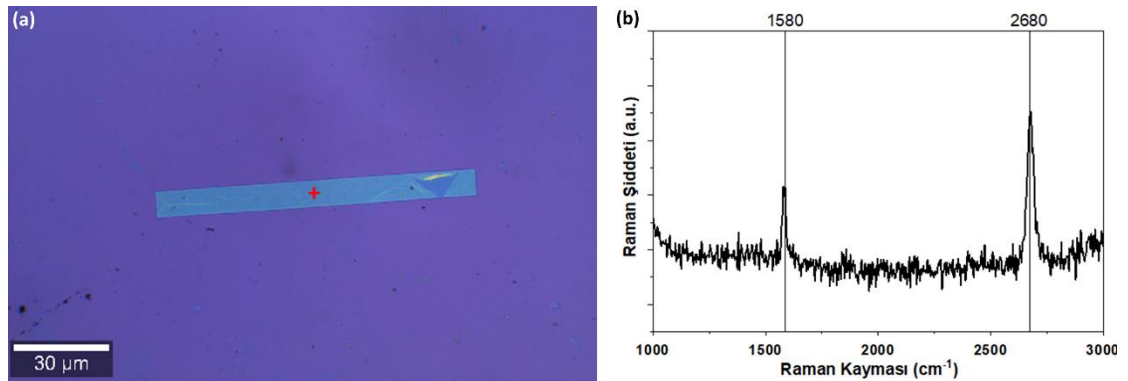
Şekil 37. (a) ICP-RIE ile aşındırılarak Grafen tabakası desenlenmiştir. (b) Fotorezist yüzeyden uzaklaştırıldıktan sonra elde edilen numunenin gösterimi.

ICP-RIE ile Grafen tabakasının aşındırılması için Tablo 4'te sunulan reçete kullanılmıştır.

Tablo 4. Grafen tabakasının aşındırılması için kullanılan reçete.

Parametre	Değer
Gaz stabilizasyon süresi	30 saniye
İşlem süresi	15 saniye
Gaz (O ₂)	30 sccm
Pompa çıkış süresi	30 saniye
ICP gücü	200 Watt
Basınç	10 mTorr
Elektrot gücü	30 Watt

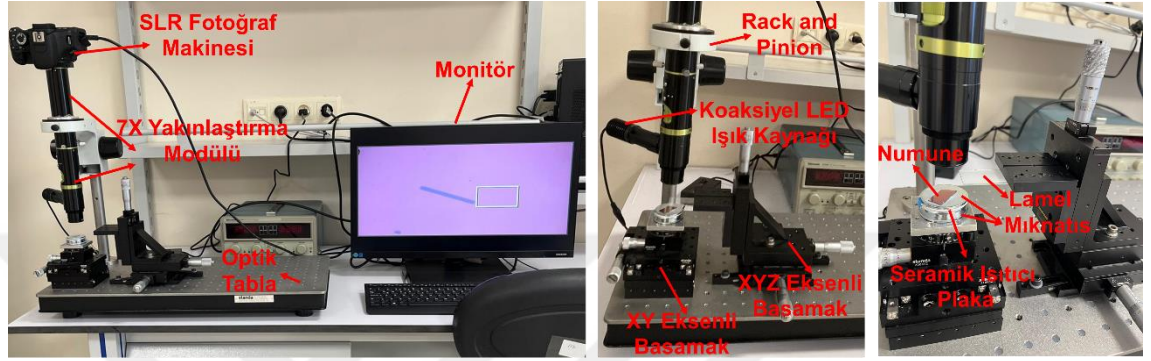
Fotolitografi ve ICP-RIE ile oluşturulan ~40 µm genişliğe sahip Grafen şeritlerin OM görüntüleri ve Raman spektrumları Şekil 38'de sunulmuştur.



Şekil 38. (a) ICP-RIE ile oluşturulan Grafen şeritler. (b) Grafen şerit için elde edilen Raman spektrumu.

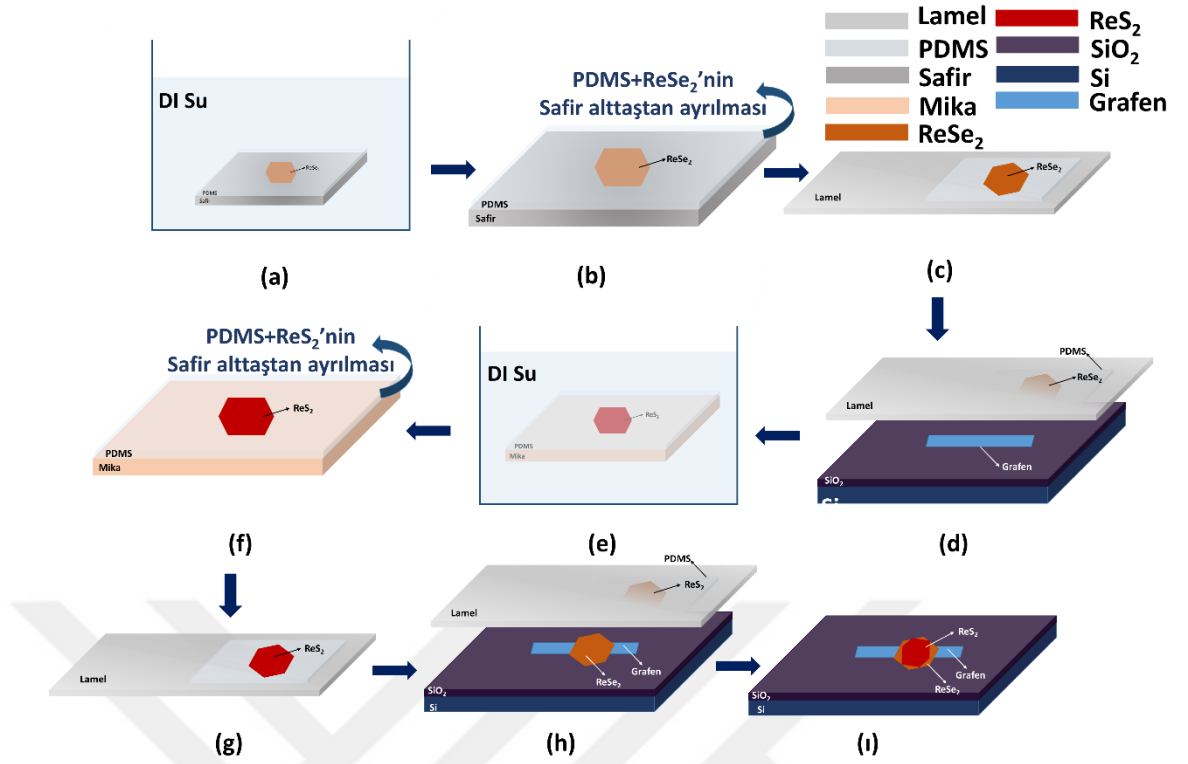
3.5. Kuru Transfer ile 2B Malzemelerin İstiflenmesi ve Metalizasyon

ReSe₂, ReS₂ ve Grafen tabakalar 2B malzeme transfer sistemi kullanılarak Si/SiO₂/p-Si alttaşı üzerine üst üste yerleştirilmiştir. Tez çalışmasında ıslak transfere kıyasla kirliliğe neden olmadığı için kuru transfer yöntemi tercih edilmiştir. Ayrıca, kuru transfer yöntemi 2B pulların konumlandırmasını kolaylaştırmaktadır (Li et al., 2022). Tez çalışmasında Şekil 39’da sunulan 2B malzeme transfer sistemi kullanılmıştır.



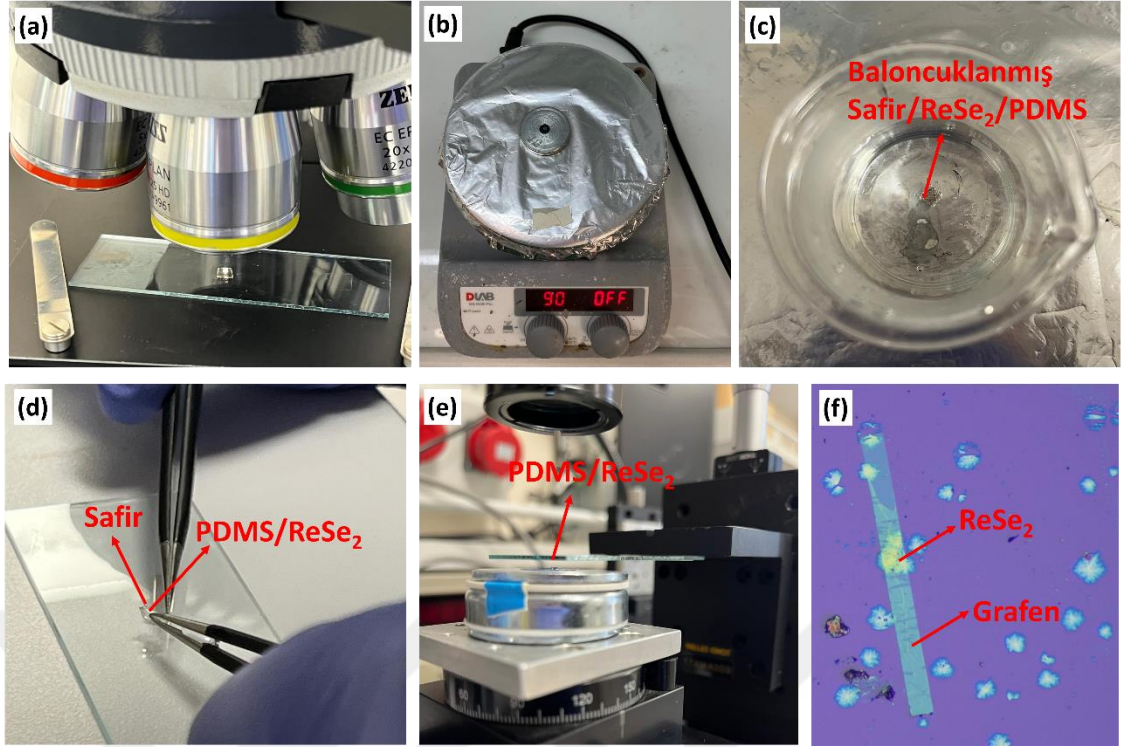
Şekil 39. Kuru transfer işlemi için kullanılan 2B malzeme transfer sistemi ve bileşenleri.

Tez kapsamında gerçekleştirilen kuru transfer işlemlerinde destek polimeri olarak PDMS kullanılmıştır. PDMS, yüzey enerjisi düşük bir polimerdir (~20 mN/m). ReSe₂ ve ReS₂ yapılarının CVD ile sentezi için kullanılan safir ve mika alttaşlar ise yüksek yüzey enerjili ve atomik düzeyde düz yüzeylerdir. Diğer bir deyişle, 2B malzemeler ile alttaş arasındaki bağlanma enerjisi PDMS’in yapışma enerjisinden daha büyüktür ve bu durum 2B malzemelerin PDMS’e tutunmasını engellemektedir. Deiyonize su deliminasyonu ile 2B yapıların PDMS’e tutunması sağlanabilmektedir. Hidrofilik safir veya mika yüzeyle daha güçlü etkileşim kuran su, iki katman arasına girerek 2B malzeme ile alttaş arasındaki vdW bağlarını zayıflatır. Bu durum, PDMS’nin üstten uyguladığı mekanik soyma kuvvetiyle birleşerek delaminasyonu kolaylaştırır (Xu et al., 2015; Schranghamer et al., 2021). ReSe₂ ve ReSe₂ yapıları DI deliminasyon ile PDMS yüzeyine aktarılmış ve lamele yapıştırılan PDMS Şekil 35’te sunulan kuru transfer sistemi yardımıyla Grafen elektrot üzerine hizalanıp aktarılmıştır. ReSe₂ ve ReSe₂ yapılarının Grafen şerit üzerine DI deliminasyon destekli kuru transfer işleminin adımları Şekil 40’da sunulmuştur.



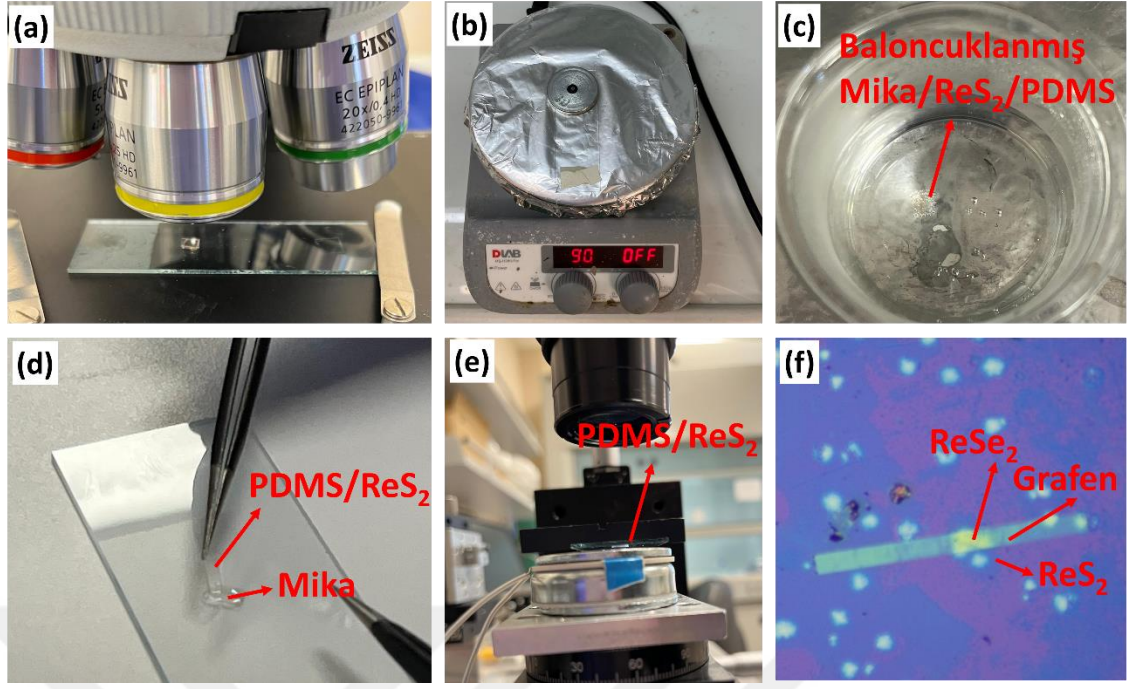
Şekil 40. ReSe₂ ve ReSe₂ yapılarının DI deliminasyon destekli kuru transfer işleminin adımları.

CVD metodu ile üretilmiş ReSe₂ pulları Şekil 41'deki gibi DI su yardımıyla safir alttaştan PDMS filme aktarılmıştır. PDMS/ReSe₂ yapısı cam lamel yardımıyla XYZ mikromanipülatöre sabitlenmiş ve kuru transfer sistemi aracılığıyla PDMS/ReSe₂ Grafen şerit üzerine konumlandırılmıştır. Hedef alttaş ile PDMS/ReSe₂ temas ettirildikten sonra numune katmanı 90 °C'ye ısıtılmış ve 2 dakika bu sıcaklıkta sabit bırakılmıştır. Daha sonrasında mikromanipülatör yardımıyla PDMS film yavaşça soyulmuş ve Şekil 41 (f)'de sunulan yapı elde edilmiştir.



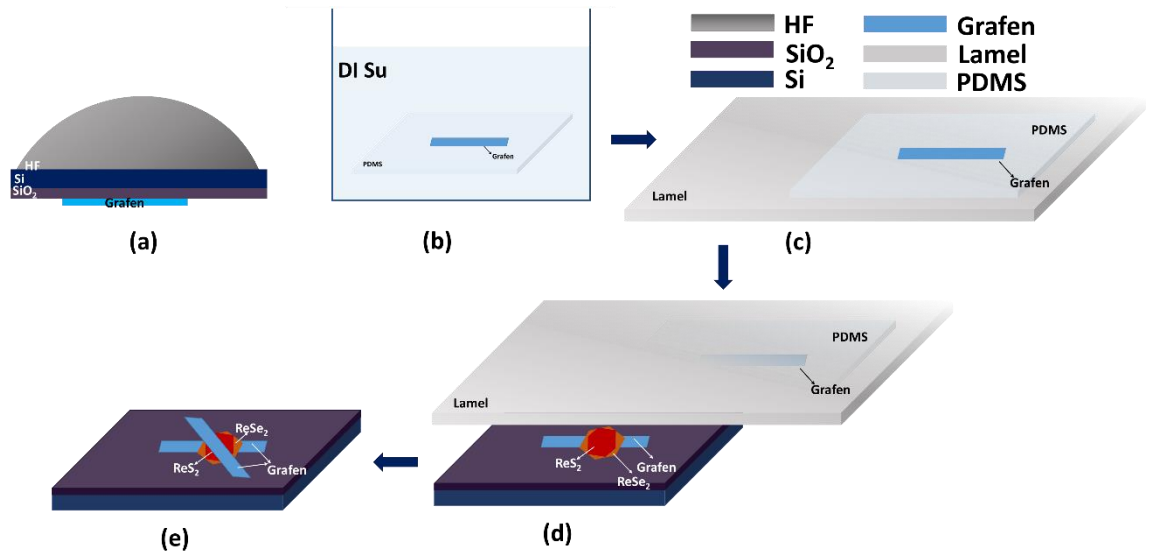
Şekil 41. (a) Pul konumunun OM yardımıyla belirlenmesi, (b) transfer edilecek ReSe₂ numuneye PDMS'in daha iyi yapışması için 3 dakika boyunca 30 gram ağırlık ile 90°C sıcaklık uygulanması, (c) numunenin 90 °C sıcaklıktaki DI suya daldırılıp 10 dakika boyunca bekletilmesi, (d) PDMS/ReSe₂'nin safir alttaştan ayrılması, (e) lamel/PDMS/ReSe₂'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/ReSe₂'in Grafen şerit üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ReSe₂.

Daha sonra, ReS₂ pulları Şekil 42'deki gibi DI su yardımıyla mika alttaştan PDMS filme aktarılmıştır. PDMS/ReS₂ yapısı cam lamel yardımıyla XYZ mikromanipülatöre sabitlenmiş ve kuru transfer sistemi aracılığıyla PDMS/ReS₂, Grafen/ReSe₂ yapısı üzerine konumlandırılmıştır. Hedef alttaş ile PDMS/ReS₂ temas ettirildikten sonra numune katmanı 90 °C'ye ısıtılmış ve 2 dk bu sıcaklıkta sabit bırakılmıştır. Daha sonrasında mikromanipülatör yardımıyla PDMS film yavaşça soyulmuş ve Şekil 42 (f)'de sunulan Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı elde edilmiştir.



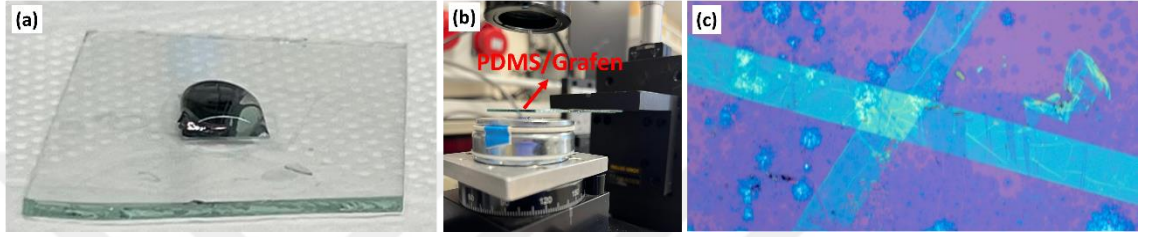
Şekil 42. (a) Pul konumunun OM yardımıyla belirlenmesi, (b) transfer edilecek ReS_2 numuneye PDMS'in daha iyi yapışması için 3 dakika boyunca 30 gram ağırlık ile 90°C sıcaklık uygulanması, (c) numunenin 90°C sıcaklıktaki DI suya daldırılıp 5 dakika boyunca bekletilmesi, (d) PDMS/ ReS_2 'nin mika alttaştan ayrılması, (e) lamel/PDMS/ ReS_2 'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/ ReS_2 'in Grafen/ ReSe_2 yapısı üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ ReSe_2 / ReS_2 yapısı.

Üst Grafen elektrodun transferi için Şekil 43'te işlem adımları sunulan hidroflorik asit (HF) destekli bir yöntem tercih edilmiştir.



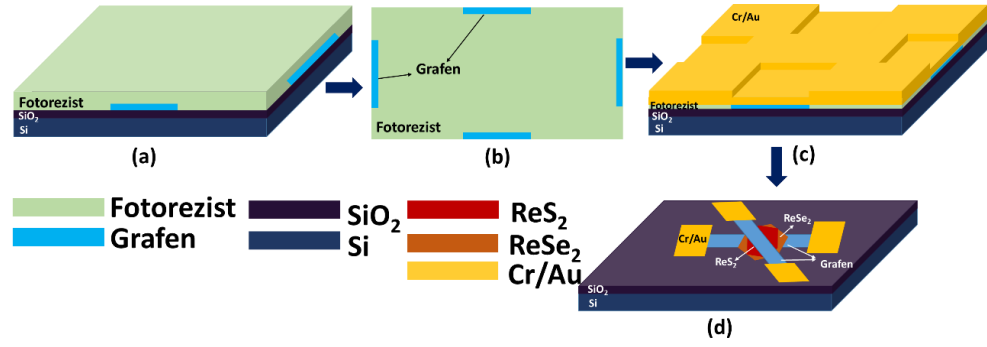
Şekil 43. Grafen şeridin HF destekli transfer işleminin adımları.

SiO₂/p-Si alttaşı üzerindeki Grafen şerit, Şekil 44'teki gibi SiO₂ tabakasının HF çözeltisi (DI su: HF; 2: 1) kullanılarak 90 s aşındırılması sonucunda PDMS filme aktarılmıştır. PDMS/Grafen yapısı cam lamel yardımıyla XYZ mikromanipülatöre sabitlenmiş ve kuru transfer sistemi aracılığıyla PDMS/Grafen, Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı üzerine konumlandırılmıştır. Hedef alttaşı ile PDMS/Grafen temas ettirildikten sonra numune katmanı 90 °C'ye ısıtılmıştır. Numune, 2 dk bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonrasında mikromanipülatör yardımıyla PDMS film yavaşça soyulmuş ve Şekil 44 (c)'de sunulan Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısı elde edilmiştir.



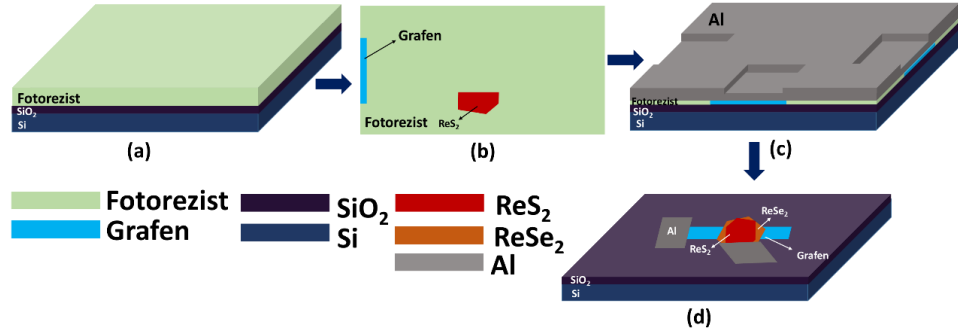
Şekil 44. (a) PDMS/Grafen/ SiO₂/p-Si üzerine SiO₂ tabakasını eritmek amacıyla HF çözeltisinin damlatılması, (b) lamel/PDMS/Grafen'in XYZ mikromanipülatöre sabitlenmesi ve PDMS/Grafenin'in Grafen/ReSe₂/ReS₂ üzerine odaklanması, (f) elde edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısı.

Elde edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısının metal kontaklarını oluşturmak amacıyla maskesiz litografi ve termal buharlaştırıcı kullanılmıştır. Şekil 45'te şematik olarak gösterilen işlem basamakları uygulanarak Krom/Altın (Cr/Au) metal kontaklar oluşturulmuştur. Teması ve elektriksel özellikleri iyileştirmek, omik kontak elde etmek için numune argon atmosferinde 300 °C'de 1 dk tavlannmıştır.



Şekil 45. (a) Numune, fotorezist ile döndürülerek kaplanmıştır. (b) Fotorezist kaplanan numune maskesiz litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. Pozlandırılan numune banyo kimyasalı (developer) içinde bekletilmiş, DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (c) Termal buharlaştırıcı kullanılarak numuneye sırasıyla Krom ve Altın kaplanmıştır. Numuneler aseton içinde bekletilmiş ve Fotorezist kalıntıları kaldırılmıştır (Lift off). Daha sonra numune DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (d) Fabrikasyon adımları sonucunda elde edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen heteroeklem fotodedektör.

Ayrıca Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısında da Alüminyum (Al) metal kontaklar oluşturulmuştur. Al kontaklar Şekil 46’da sunulan işlem basamakları uygulanarak oluşturulmuştur.

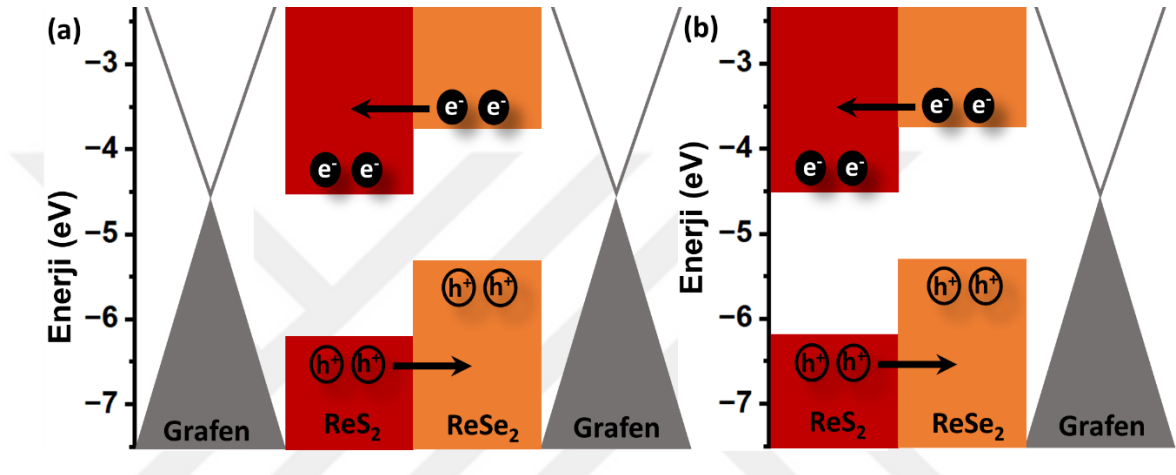


Şekil 46. (a) Numune, fotorezist ile döndürülerek kaplanmıştır. (b) Fotorezist kaplanan numune maskesiz litografi cihazı kullanılarak pozlandırılmıştır. Pozlandırılan numune banyo kimyasalı içinde bekletilmiş, DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (c) Termal buharlaştırıcı kullanılarak numuneye Alüminyum kaplanmıştır. Numuneler aseton içinde bekletilmiş ve Fotorezist kalıntıları kaldırılmıştır. Daha sonra numune DI su ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur. (d) Fabrikasyon adımları sonucunda elde edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroeklem fotodedektör.

Metal teması ve elektriksel özellikleri iyileştirmek, omik kontak elde etmek için numune argon atmosferinde 300 °C’de 1 dakika tavlannmıştır.

3.6. 2B Fotodedektör Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu

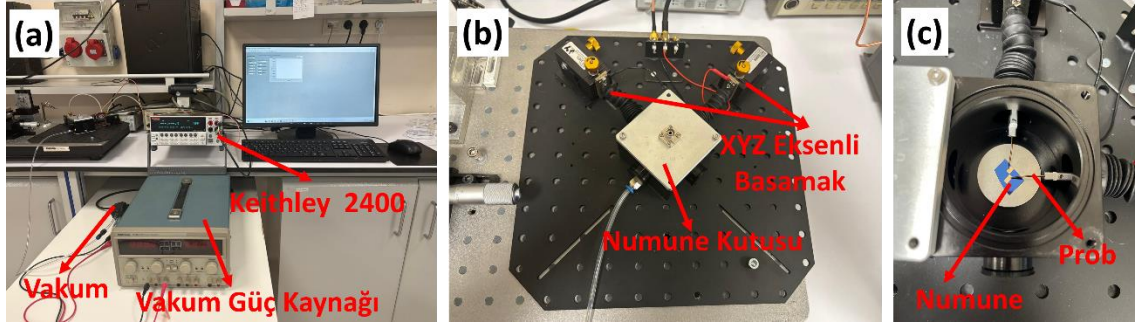
Tez kapsamının kapsamında, 2B ReS₂ ve ReSe₂ tabakaları ile Grafen elektrotlar kullanılarak sandviç yapıdaki Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen fotodedektör ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör üretilmiştir. Üretilen fotodedektörlerin bant hizalaması Şekil 47’deki gibidir.



Şekil 47. (a) Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen ve (b) Grafen/ReSe₂/ReS₂ Fotodedektörün enerji bant diyagramı.

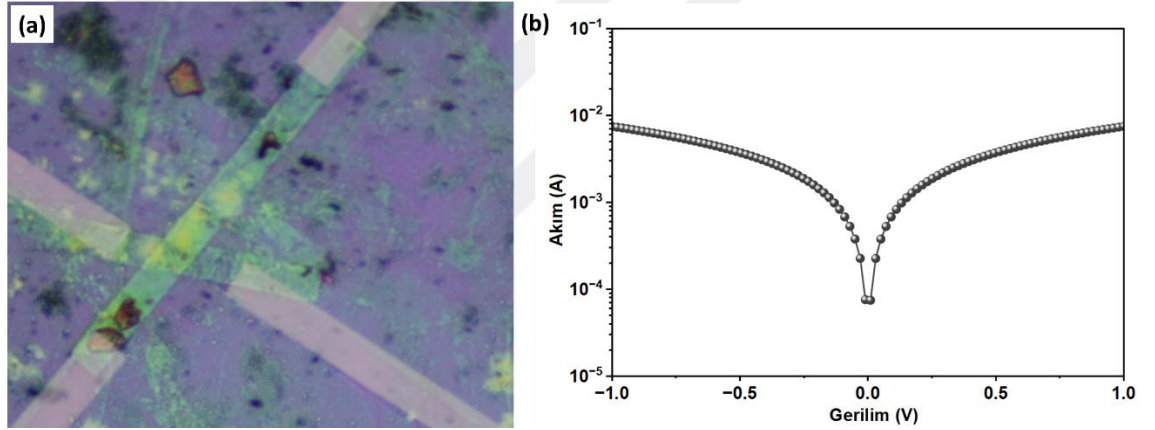
Üretilen aygıtlarda ReS₂ ve ReSe₂ avantajlarını birleştirmek amacıyla p-n eklem oluşturulmuştur. Tabaklar arasında Şekil 47’den görüldüğü üzere tip II bant hizalaması oluşmuştur. Tip II bant hizalaması uyarılmış taşıyıcıların ayrılmasını kolaylaştırır ve çoğunluk taşıyıcıların tünellemesiyle güçlü ara katman eşleşmeleri sağlar, böylece daha yüksek duyarlılık değerleri elde edilebilir.

Cihazların elektriksel performansını değerlendirmek için yüksek hassasiyetli bir dijital kaynak ölçer (sourcemeter) ile karanlıkta ve aydınlıkta I-V eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler ile elektriksel taşıma özellikleri karakterize edilmiştir. I-V eğrilerinin elde edilmesi amacıyla Şekil 48’deki deney düzeneği kullanılmıştır. Şekil 48’de gösterildiği gibi kaynak ölçer kullanılarak fotodedektöre gerilim uygulanmış ve numune üzerine düşürülen ışığın oluşturduğu fotoakım ölçülmüştür. Tüm ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



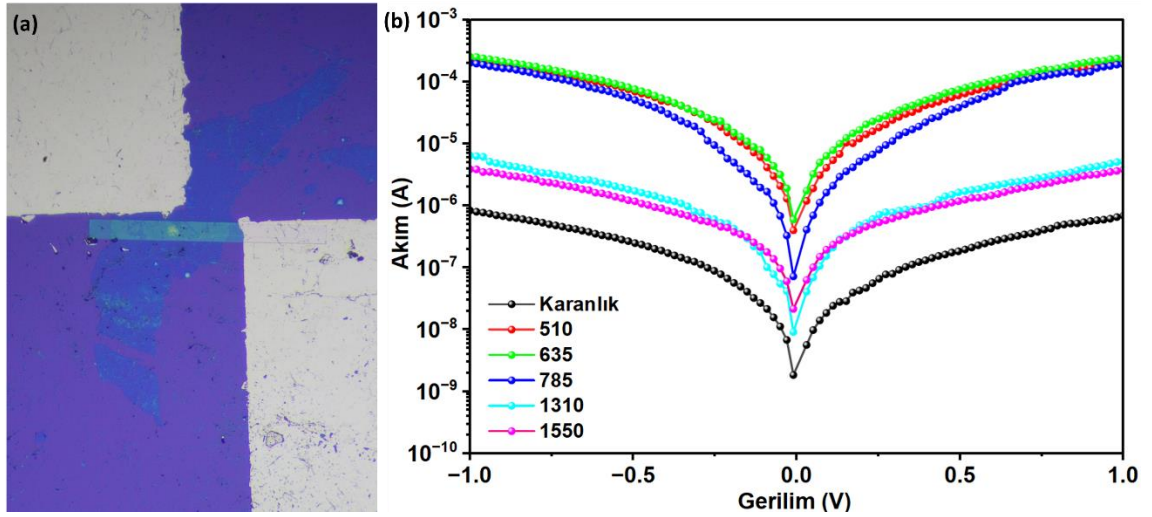
Şekil 48. Fotodedektör karakterizasyon deney düzeneği.

Ölçümler sırasında uyarım için ışık kaynağı olarak 5 mW gücünde 532 nm, 637 nm, 785 nm, 1310 nm ve 1550 nm dalga boyuna sahip lazerler kullanılmıştır. Böylece VIS'den NIR'e geniş bir spektral aralıkta fotodedektörün tepkisi incelenmiştir. Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen fotodedektörü için karanlıkta Şekil 49'da sunulan I-V eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 49. (a) Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü, (b) Üretilen aygıtın I-V eğrisi.

Ancak, Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısının ışık uygulandığında yanıt vermediği görülmüştür. Bu durumun litografi ve metalizasyon aşamalarının yüzeyi kirlenmesi ve üst Grafenin transfer sırasında zarar görmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısına ek olarak üst Grafen elektrot yerine metal kotak kullanılan Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör üretilmiştir. Şekil 50'de sunulan I-V eğrileri elde edilmiştir.



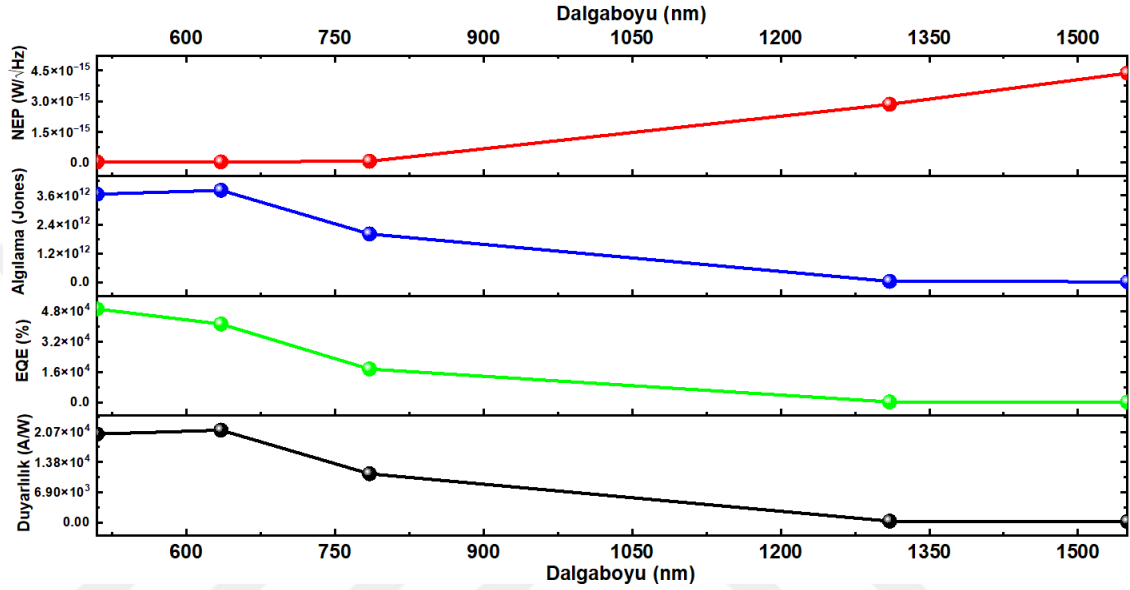
Şekil 50. (a) Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü, (b) Üretilen aygıtın I-V eğrisi.

Şekil 50’de görüldüğü üzere üretilen fotodedektörün fotoakımı dalga boyuna güçlü bir bağlılık göstermektedir. 510 nm ($\sim 2,43$ eV), 635 nm ($\sim 1,95$ eV) ve 785 ($\sim 1,57$ eV) dalga boylarında ışık altında üretilen akımın 1310 nm ve 1550 nm dalga boylarında ışık uygulandığında üretilen akımdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Tez kapsamında CVD ile üretilen ReS₂’nin bant aralığı $\sim 1,74$ eV olarak ölçülmüştür. ReSe₂’nin bant aralığı değerinin ise yaklaşık $\sim 1,3$ eV civarında olması beklenmektedir. Dolayısıyla 510 nm ve 635 nm dalga boyundaki fotonlar hem ReS₂’nin hem ReSe₂’nin bant aralığından daha enerjiktir, bu fotonlar soğurularak elektron-boşluk çiftleri oluşturulabilir. Bu nedenle en yüksek akım değerleri 510 nm ve 635 nm dalga boyundaki ışık için elde edilmiştir. 785 nm civarında ise foton enerjisi ReS₂’nin bant aralığının altındadır. Ancak, ReSe₂’nin bant aralığının üstündedir. Bu nedenle 785 nm’de oluşan fotoakım daha zayıftır. Cihazın 1310 nm ve 1550 nm gibi haberleşme dalga boylarında ise foto akımının belirgin biçimde düştüğü görülmektedir. 1310 nm ($\sim 0,95$ eV) ışığı ReSe₂ ve ReS₂ tek başına absorbe edememektedir. Ancak, heteroeklem oluşturulduğunda durum değişmekte ve ReSe₂’nin valans bant maksimumundan ReS₂’nin iletim bandı minimumuna yeni bir optik geçiş yolu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla heteroeklem, bireysel tabakaların algılayamadığı 1310 nm bölgesini bile algılayabilmiştir.

ReS₂/ReSe₂ p-n ekleminin algılayamadığı dalga boylarında Grafen tabaka sadece elektrot görevi görmemekte, ışık da soğurmaktadır. Yani aygıt Grafen fotodedektör gibi davranmaktadır. Grafen’de soğurulan 1550 nm dalga boyundaki fotonlar, içsel emisyon yoluyla ReSe₂/ReS₂ katmanına sıcak taşıyıcı enjeksiyonu yapabilmektedir. Bu nedenle

üretile yapı 1550 nm dalga boyunu aldılabilmiştir. I-V eğrileri incelendiğın harici gerilim uygunlanmadığında da yani 0 V noktasında cihazın çalışabildiğı görölmektedir.

Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektörünün aktif alanı yaklaşık olarak ~0.02 mm²'dir ve uygulanan lazer ışık kaynaklarının gücü optik güç ölçer kullanılarak 5 mW olarak ölçölmüşür. Bu bilgiler ve -1 V besleme için üretile cihazın NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değeri Şekil 51'deki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 51. Şekil 50'de sunulan dedektör yapısı için hesaplanan NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değeri.

Şekil 51 incelendiğinde heteroyapılı fotodedektör, 510 nm'den itibaren uzun dalga boylarına kadar duyarlılık göstermektedir. Cihazın algılama limiti, yani fotonlara etkin şekilde yanıt verebildiğı en uzun dalga boyu yaklaşık 1.5 µm civarındadır. Grafikte 1350 nm sonrasında cihaz performansı belirgin biçimde azalmaktadır.

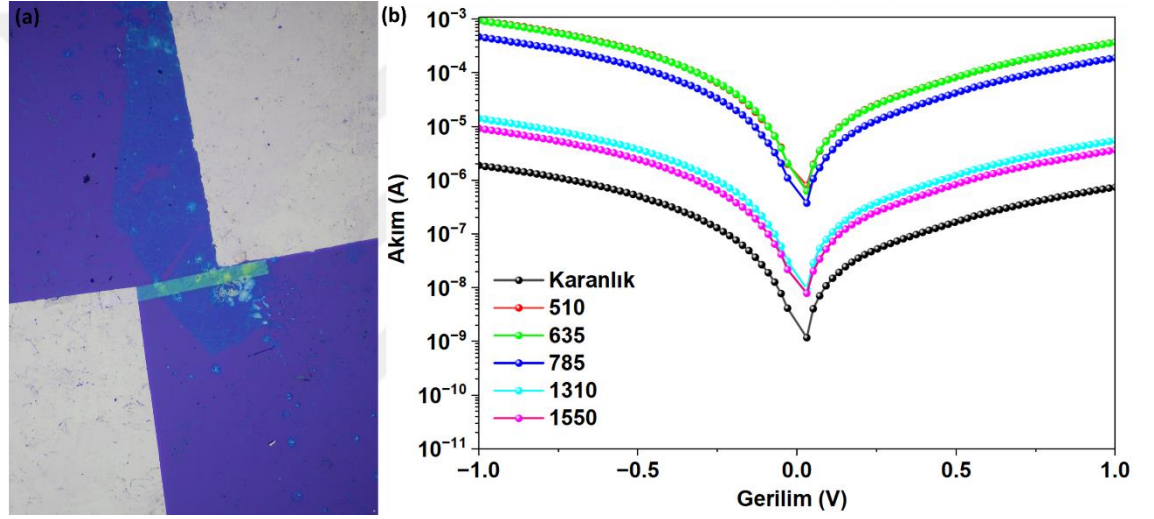
Literatürdeki ReSe₂/ReS₂ dedektörler ve Grafen/ReX₂ yapıları ile üretile dedektörler için 10⁴ ile 10⁷ A/W aralığında yüksek optik duyarlılıklar bildirilmiştir (Kang vd., 2018; Jo vd., 2018; Elahi vd., 2020; Silva vd., 2021; Li vd., 2021). Tez kapsamında üretile fotodedektör ile duyarlılığın 10⁴ A/W'nin mertebesinde duyarlılık elde edilmiştir.

Algılama, duyarlılık ile doğru, karanlık akım değeri ile ters orantılıdır. Dolayısıyla karanlık akım değeri de algılama için belirleyici bir değerdir. Tasarlanan dedektörün p-n eklemi tarafından karanlık akım bastırılmakta ve böylece algılama artıp eşdeğer gürültü gücü azalmaktadır. Bu şekilde harici kuantum verimliliğı de artmaktadır. Üretile

dedektör için 4.8×10^4 olarak hesaplanmıştır. Algılama literatüre uygun biçimde yüksek duyarlılık değerlerinin bir sonucu olarak $3,6 \times 10^{12}$ Jones civarında hesaplanmıştır.

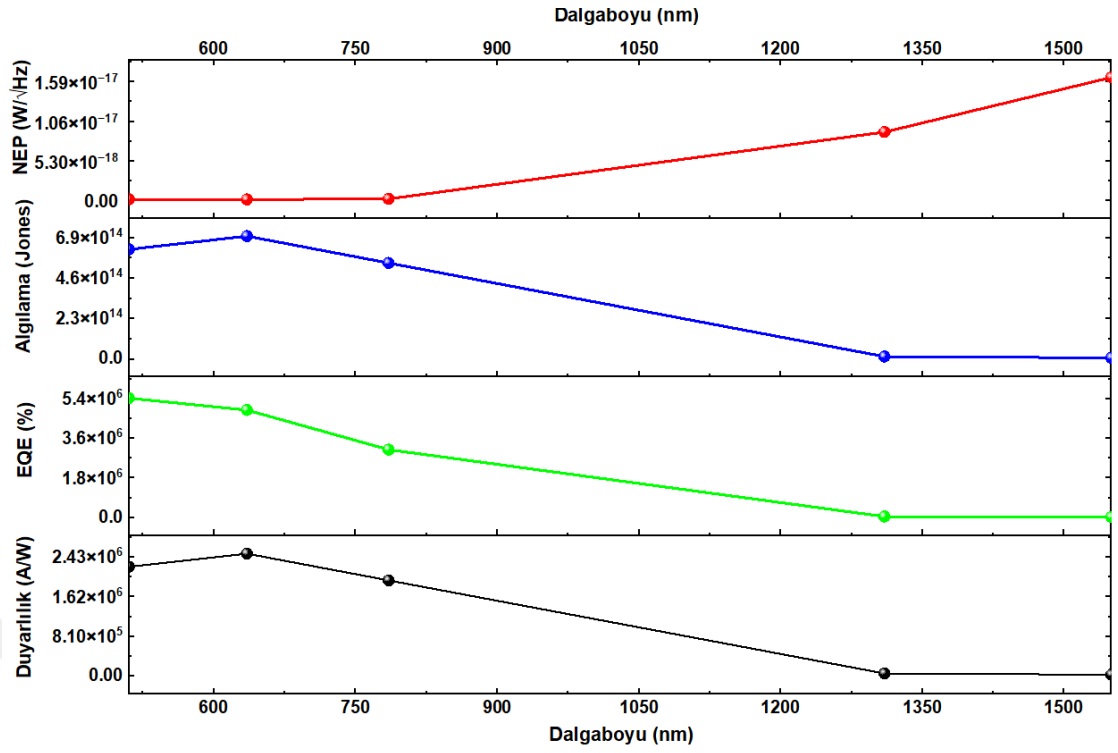
Dedektörün sinyali gürültüden ayırt edebileceği eşdeğer gürültü gücü yani NEP, kısa dalga boylarında düşmektedir. Yani cihaz kısa dalga boylarında daha hassas çalışmaktadır. Uzun dalga boylu fotonlar cihazda daha zayıf fotoyanıt oluşturduğundan, belirli bir siny/gürültü oranı için gereken asgari optik güç artmaktadır (Silva et al., 2021).

Son olarak aygıt üretim prosesinin tekrarlanabilirliğini incelemek amacıyla bir tane daha Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroeklem fotodedektör üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Şekil 52’de sunulan I-V eğrisi ve Şekil 53’te sunulan NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değerleri elde edilmiştir.



Şekil 52. (a) Tekrar üretilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ heteroeklem fotodedektör optik mikroskop görüntüsü ve (b) aygıtın I-V eğrisi.

Üretilen aygıtın dalga boyuna bağımlılığının diğer aygıt ile neredeyse aynı olduğu ancak fotoakım değerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun yapıda birden fazla ReSe₂ pulu olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 53. Şekil 52’de sunulan dedektör yapısı için hesaplanan NEP, algılama, EQE ve duyarlılık değerleri.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geleneksel yarıiletken fotodedektörler, geniş çapta araştırılmış ve kolay entegre edilebilir, düşük maliyetli olmaları nedeniyle başarılı bir şekilde ticarileşebilmişlerdir. Silisyum ve daha dar bant aralığına sahip III-V grubu yarıiletken bileşikler (InSb, GaSb, HgCdTe) ile NIR ve LWIR arasındaki algılama aralığı elde edilir. Bu dedektörler, 10^{10} - 10^{13} Jones aralığında yüksek algılama kabiliyetine sahip olmalarına rağmen kriyojenik sıcaklıktan muzdariptirler ve esnek değildirler. Son on beş yılda, 2B malzemelerin kullanıldığı fotodedektörler, oda sıcaklığında, geniş bant aralıklı, yüksek hızlı, hassas algılama ve esneklik potansiyeli açısından ilgi çekici bir konu olmuştur ve yoğun şekilde araştırılmıştır.

2B optoelektronik aygıtların düşük maliyetli ve zaman tasarruflu araştırılması için yazılım paketleri kullanılmaktadır. Tez kapsamında, SCAPS-1D yazılım paketi kullanılarak p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapıları simüle edilmiştir. Simüle edilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı için p-cSi/PSi/ReS₂/Grafen yapısına kıyasla daha yüksek performans elde edilmiştir. 550 nm’de % 96,37 EQE ve 790 nm’de 0,54 A/W R elde edilmiştir. Bu sebeple, Grafen/ReSe₂/ReS₂ yapısı deneysel olarak üretilmiştir. Ayrıca bu yapıya ek olarak Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen yapısı deneysel olarak üretilip incelenmiştir.

2B malzemelerin kullanıldığı optoelektronik aygıt uygulamalarında çoğunlukla, rastgele boyutlarda pulların üretildiği mekanik eksfoliasyon yöntemi tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında ise CVD tekniği kullanılarak cihaz tasarımına uygun ReSe₂ ve ReS₂ pulları üretilmiş ve cihaz fabrikasyonu için kullanılmıştır. CVD metodu, cihaz uygulamaları için ölçeklenebilir, yüksek kaliteli ve tekrarlanabilir ReX₂ üretim imkanı sunduğu için tercih edilmiştir. Grafen elektrotlar, ticari olarak temin edilen Grafen filmler kullanılarak elde edilmiştir. Bu filmler, ıslak transfer yöntemi ile SiO₂/p-cSi alttaş üzerine aktarılmıştır. Islak transfer işlemini takiben, litografi ve ICP-RIE yöntemiyle istenilen boyutlarda Grafen şeritler oluşturulmuştur. CVD yöntemiyle, cihaz mimarisine uygun şekilde kontrollü olarak büyütülen ReSe₂, ReS₂ pulları ve Grafen elektrot, PDMS destekli kuru transfer tekniğiyle SiO₂/p-cSi alttaş üzerinde üst üste istiflenmiştir. Son olarak gerçekleştirilen metalizasyon işlemi ile fotodedektör yapısı elde edilmiştir.

Tez kapsamında incelenen Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen ve Grafen/ReSe₂/ReS₂ aygıt yapılarını inceleyen herhangi bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır. Üretilen

Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör ile 510 nm'den 1550 nm'e geniş bir spektral algılama yapılabilmektedir. Bu durum, 2B ReSe₂/ReS₂ malzemelerinin algılayamadığı dalgalarda Grafen'in foton absorbe etmesi ve taşıyıcı üretmesi ile açıklanmaktadır. Dolayısıyla, bu frekanslarda Grafen sadece elektrot olarak değil aynı zamanda fotodedektör gibi davranmıştır. Ancak bu yapının literatürdeki Grafen fotodedektörlere kıyasla cihaz duyarlılığı daha yüksektir. Bu durum p-n eklem eksiton ayırma verimliliğini önemli ölçüde artırması ve böylece duyarlılığı artırarak yüksek fotoakım oluşturmaya ile açıklanabilmektedir.

Üretilen Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör ile 510 nm dalga boyunda 5 mW güçte lazer ışığı kullanılarak 10⁴ A/W mertebesinde duyarlılık, % 4.8×10⁴ EQE ve 3,6×10¹² Jones algılama hesaplanmıştır. Ayrıca üretilen cihazın harici güç kaynağı kullanılmadan (self-driven mode) algılama yapabildiği görülmüştür. Üretilen fotodedektörün geniş dalga boyu aralığında algılama yapabilmesi bu tip fotodedektörler kuantum haberleşme, otonom araçlar, akıllı tarım, gece görüş sistemleri, uzay ve uydu tabanlı algılama gibi ileri teknolojik alanlarda kullanıldığı için önemlidir. Ayrıca üretilen aygıtın harici güç kaynağı kullanılmadan çalışması enerji verimliliği açısından önemlidir.

2B malzemelerin CVD ile üretiminin ve aygıt fabrikasyonunun tekrarlanabilir üretimi de tez kapsamında araştırılmıştır. Farklı zamanlarda yapılan CVD deneylerinden elde edilen ReSe₂ ve ReS₂ yapıları kullanılarak iki ayrı Grafen/ReSe₂/ReS₂ fotodedektör üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Cihazların dalga boyuna bağlı tepkisinin benzer olduğu ancak üretilen fotoakım miktarlarının değiştiği görülmüştür. Bu durumun yapılardaki pul boyutlarının farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Tez kapsamında Grafen/ReSe₂/ReS₂/Grafen fotodedektör de üretilmiş ancak uygulanan ışık için bir tepki alınamamıştır. Bunun sebebinin transfer yöntemlerinin sebep olduğu kirlilikler veya transfer sırasında üst Grafen'in zarar görmesi olabileceği düşünülmektedir. Transfer yöntemlerinin geliştirilmesiyle polimerlerin sebep olduğu kalıntıların minimuma indirilmesinin aygıt performansını arttıracakı düşünülmektedir.

2B malzemelerin keşfi ve elektroniğe uygulanması henüz gelişim aşamasındadır ve yeni cihaz konseptleri için umut verici fırsatlar sunmaktadır. Bu fırsatları değerlendirmek için, deneysel ilerlemeye güçlü bir teorik destek gerekmektedir. Bu bağlamda, malzeme ve cihaz tanımlamaları için farklı doğruluk ve karmaşıklık seviyelerini birleştiren çok ölçekli hesaplamalı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKÇA

- Afzal, A. M., Iqbal, M. Z., Dastgeer, G., Nazir, G., & Eom, J. (2021). Ultrafast and highly stable photodetectors based on p-GeSe/n-ReSe₂ heterostructures. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13, 47882–47894.
- Ahn, J., Kyhm, J.-H., Kang, H. K., Kwon, N., Kim, H.-K., Park, S., & Hwang, D. K. (2021). 2D MoTe₂/ReS₂ van der Waals heterostructure for high-performance and linear polarization-sensitive photodetector. *ACS Photonics*, 8, 2650–2658.
- Aslan, B., Chenet, D. A., Van Der Zande, A. M., Hone, J. C., & Heinz, T. F. (2015). Linearly polarized excitons in single- and few-layer ReS₂ crystals. *ACS Photonics*, 3(1), 96–101.
- Aydin, B., & Duman, Ç. (2023). Optimization of electrode, interlayer and absorber layers of a Gr/ReS₂/PSi/p-cSi photovoltaic solar cell with SCAPS. *Journal of Electronic Materials*, 52(7), 4809–4821.
- Aydin, B. (2025). Photovoltaic investigation of diamane emitter layer with AFORS-HET. *Optics & Laser Technology*, 186, 112696.
- Kang, B., Kim, Y., Cho, J. H., & Lee, C. (2017). Ambipolar transport based on CVD-synthesized ReSe₂. *2D Materials*, 4(2), 025014. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa591f>
- Buapan, K., Somphonsane, R., Chiawchan, T., & Ramamoorthy, H. (2021). Versatile, low-cost, and portable 2D material transfer setup with a facile and highly efficient DIY inert-atmosphere glove compartment option. *ACS Omega*, 6(28), 17952–17964.
- Burgelman, M., Nollet, P., & Degraeve, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin Solid Films*, 361, 527–532.
- Cao, X., Jiang, C., Tan, D., Li, Q., Bi, S., & Song, J. (2021). Recent mechanical processing techniques of two-dimensional layered materials: A review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 6(2), 135–152.
- Cao, Y., Wang, X., Lin, X., Yang, W., Lv, C., Lu, Y., ... & Zhao, W. (2020). Movable-type transfer and stacking of van der Waals heterostructures for spintronics. *IEEE Access*, 8, 70488–70505.
- Castellanos-Gomez, A., Buscema, M., Molenaar, R., Singh, V., Janssen, L., Van Der Zant, H. S. J., & Steele, G. A. (2014). Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping. *2D Materials*, 1, 011002.
- Cheliotis, I., & Zergioti, I. (2024). A review on transfer methods of two-dimensional materials. *2D Materials*, 11(2), 022004.
- Chen, P., Wang, J., Lu, Y., Zhang, S., Wang, Z., & Wang, L. (2018). A simple approach to recognize axial direction of ReS₂ single crystals grown by chemical vapor deposition. *Physica Status Solidi (b)*, 255(8), 1800142.
- Chen, X., Wong, L. W., Huang, L., Zheng, F., Huang, R., Lau, S. P., ... & Ly, T. H. (2021). Unveiling the critical intermediate stages during chemical vapor deposition of two-dimensional rhenium diselenide. *Chemistry of Materials*, 33(17), 7039–7046.

- Chiu, M. H., Tseng, W. H., Tang, H. L., Chang, Y. H., Chen, C. H., Hsu, W. T., Chang, W. H., Wu, C. I., & Li, L. J. (2017). Band alignment of 2D transition metal dichalcogenide heterojunctions. *Advanced Functional Materials*, 27(19), 1603756.
- Cho, A. J., Namgung, S. D., Kim, H., & Kwon, J. Y. (2017). Electric and photovoltaic characteristics of a multi-layer ReS₂/ReSe₂ heterostructure. *APL Materials*, 5(7), 076101.
- Cui, F., Li, X., Feng, Q., Yin, J., Zhou, L., Liu, D., Liu, K., He, X., Liang, X., & Liu, S. (2017). Epitaxial growth of large-area and highly crystalline anisotropic ReSe₂ atomic layer. *Nano Research*, 10, 2732–2742.
- Cui, F., Wang, C., Li, X., Wang, G., Liu, K., Yang, Z., Feng, Q., Liang, X., & Zhang, J. (2016). Tellurium-assisted epitaxial growth of large-area, highly crystalline ReS₂ atomic layers on mica substrate. *Advanced Materials*, 28(25), 5019–5024.
- Dastgeer, G., Afzal, A. M., Nazir, G., & Sarwar, N. (2021). p-GeSe/n-ReS₂ heterojunction rectifier exhibiting a fast photoresponse with ultra-high frequency-switching applications. *Advanced Materials Interfaces*, 8, 2100705.
- Du, C., Gao, H., Sun, Y., Liu, M., Li, J., Sun, J., ... & Li, K. (2024). High-performance self-driven ultraviolet-visible photodetector based on type-II WS₂/ReSe₂ van der Waals heterostructure. *Journal of Alloys and Compounds*, 976, 173122.
- Duerloo, K. A. N., Li, Y., & Reed, E. J. (2014). Structural phase transitions in two-dimensional Mo- and W-dichalcogenide monolayers. *Nature Communications*, 5, 4214.
- Zhang, E., Wang, P., Li, Z., Wang, H. F., Song, C. Y., Huang, C., ... & Xiu, F. X. (2016). Tunable ambipolar polarization-sensitive photodetectors based on high-anisotropy ReSe₂ nanosheets. *ACS Nano*, 10(8), 8067–8077.
- Elahi, E., Khan, M. F., Rehman, S., Khalil, H. M. W., Rehman, M. A., Kim, D.-K., Kim, H., Khan, K., Shahzad, M., Iqbal, M. W., Basit, M. A., & Khan, F. (2020). Enhanced electrical and broad spectral (UV–Vis–NIR) photodetection in a Gr/ReSe₂/Gr heterojunction. *Dalton Transactions*, 49, 10017–10027.
- Feng, Q., Deng, H., Yang, H., Ke, S., Lv, H., Li, L., & Zu, X. (2021). Strain-tunable band alignment and band gap of GaSe/WTe₂ heterojunction for water splitting and light-emitting. *Results in Physics*, 28, 104605.
- Förster, A., Gemming, S., Seifert, G., & Tománek, D. (2017). Chemical and electronic repair mechanism of defects in MoS₂ monolayers. *ACS Nano*, 11(10), 9989–9996.
- Ge, Y., Lu, C., Zhao, Q., Luo, M., Liu, Y., Han, T., ... & Xu, X. (2022). Layer-dependent nonlinear absorption and refraction of ReX₂ (X = Se, S) films grown by chemical vapor deposition. *Physical Review Applied*, 18(3), 034050.
- Geng, H., Yuan, D., Yang, Z., Tang, Z., Zhang, X., Yang, K., & Su, Y. (2019). Graphene van der Waals heterostructures for high-performance photodetectors. *Journal of Materials Chemistry C*, 7, 11056–11067.
- Ghetiyya, A. B., Shah, B. S., Chaki, S. H., Tailor, J. P., & Deshpande, M. P. (2025). MoS₂-ReSe₂-ReS₂ Solar cell Optimization using SCAPS: Unveiling effect of thickness, bandgap, and carrier density. *Next Research*, 100817.

- Guo, Z., Wei, A., He, Y., He, C., Liu, J., & Liu, Z. (2019). Controllable growth of large-area monolayer ReS₂ flakes by chemical vapor deposition. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 15042–15053.
- Hafeez, M., Gan, L., Li, H., Ma, Y., & Zhai, T. (2016). Chemical vapor deposition synthesis of ultrathin hexagonal ReSe₂ flakes for anisotropic Raman property and optoelectronic application. *Advanced Materials*, 28(37), 8296–8301.
- Han, S.-T., Peng, H., Sun, Q., Venkatesh, S., Chung, K.-S., Lau, S. C., Zhou, Y., & Roy, V. A. L. (2017). An overview of the development of flexible sensors. *Advanced Materials*, 29(33), 1700375.
- He, X., Liu, F., Hu, P., Fu, W., Wang, X., Zeng, Q., Zhao, W., & Liu, Z. (2015). Chemical vapor deposition of high-quality and atomically layered ReS₂. *Small*, 11(40), 5423–5429.
- Huang, W., Gan, L., Yang, H., Zhou, N., Wang, R., Wu, W., ... & Zhai, T. (2017). Controlled synthesis of ultrathin 2D β -In₂S₃ with broadband photoresponse by chemical vapor deposition. *Advanced Functional Materials*, 27(36), 1702448.
- Huo, N., & Konstantatos, G. (2018). Recent progress and future prospects of 2D-based photodetectors. *Advanced Materials*, 30(51), 1801164.
- Intonti, K., Pelella, A., Neill, H., Patil, V., Hurley, P. K., Ansari, L., ... & Di Bartolomeo, A. (2024). ReS₂/Si 2D/3D vertical heterojunction as a self-powered photodiode. *Applied Physics Letters*, 125(17).
- Jang, C. W., & Choi, S. H. (2022). Self-powered semitransparent/flexible doped-graphene/WS₂ vertical-heterostructure photodetectors. *Journal of Alloys and Compounds*, 910, 163685.
- Jariwala, B., Voiry, D., Jindal, A., Chalke, B. A., Bapat, R., Thamizhavel, A., Chhowalla, M., Deshmukh, M., & Bhattacharya, A. (2016). Synthesis and characterization of ReS₂ and ReSe₂ layered chalcogenide single crystals. *Chemistry of Materials*, 28, 3352–3359.
- Jawa, H., Khandare, N., Varghese, A., Sahoo, S., & Lodha, S. (2023). Enhanced photoresponse of a dielectric-free suspended WSe₂–ReS₂ heterostructure photodetector. *Applied Physics Letters*, 122(12).
- Jiang, S., Hong, M., Wei, W., Zhao, L., Zhang, N., Zhang, Z., ... & Zhang, Y. (2018). Direct synthesis and in situ characterization of monolayer parallelogrammic rhenium diselenide on gold foil. *Communications Chemistry*, 1, 17.
- Jiang, S., Yang, J., Shi, Y., Zhao, J., Xie, C., Zhao, L., Fu, J., Yang, P., Huan, Y., & Xie, Q. (2020). Salt-assisted growth and ultrafast photocarrier dynamics of large-sized monolayer ReSe₂. *Nano Research*, 13, 667–675.
- Jiang, S., Zhang, Z., Zhang, N., Huan, Y., Gong, Y., Sun, M., ... & Zhang, Y. (2018). Application of chemical vapor-deposited monolayer ReSe₂ in the electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Nano Research*, 11, 1787–1797.
- Jo, B., Seo, K., Park, K., Jeong, C., Poornaprakash, B., Lee, M., ... & Kim, Y. L. (2024). Trap-assisted monolayer ReSe₂/Si heterojunction with high photoconductive gain and self-driven broadband photodetector. *Frontiers in Materials*, 11, 1354522.

- Jo, S.-H., Lee, H. W., Shim, J., Heo, K., Kim, M., Song, Y. J., & Park, J.-H. (2018). Highly efficient infrared photodetection in a gate-controllable van der Waals heterojunction with staggered bandgap alignment. *Advanced Science*, 5, 1700423.
- Kang, B., Kim, Y., Yoo, W. J., & Lee, C. (2018). Ultrahigh photoresponsive device based on ReS₂/graphene heterostructure. *Small*, 14, 1802593.
- Kang, P., Nan, H., Zhang, X., Mo, H., Ni, Z., Gu, X., Ostrikov, K., & Xiao, S. (2020). Controllable synthesis of crystalline ReS₂(1-x)Se_{2x} monolayers on amorphous SiO₂/Si substrates with fast photoresponse. *Advanced Optical Materials*, 8, 1901415.
- Karabulut, N., Aydin, B., & Duman, Ç. (2025). Numerical simulation of a graphene/n-WS₂/a-Si:H(i)/p-cSi/Ag HIT solar cell. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 33(5), 055012.
- Kim, C. R., Yoon, M. A. R., & Jang, B. S. R. (2020). A review on transfer process of two-dimensional materials. *Tribology and Lubricants*, 36(1), 1–10.
- Kim, J., Salvatore, G. A., Araki, H., Chiarelli, A. M., Xie, Z., Banks, A., & Rogers, J. A. (2016). Battery-free, stretchable optoelectronic systems for wireless optical characterization of the skin. *Science Advances*, 2(8), e1600418.
- Kim, Y., Kang, B., Choi, Y., Cho, J. H., & Lee, C. (2017). Direct synthesis of large-area continuous ReS₂ films on a flexible glass at low temperature. *2D Materials*, 4(2), 025057.
- Ku, M., Hwang, J. C., Oh, B., & Park, J. U. (2020). Smart sensing systems using wearable optoelectronics. *Advanced Intelligent Systems*, 2(3), 1900144.
- Lee, M. K., Chu, C. H., Wang, Y. H., & Sze, S. M. (2001). 1.55- μ m and infrared-band photoresponsivity of a Schottky barrier porous silicon photodetector. *Optics Letters*, 26(3), 160–162.
- Li, A., Chen, Q., Wang, P., Gan, Y., Qi, T., Wang, P., Tang, F., Wu, J. Z., Chen, R., Zhang, L., & Gong, Y. (2019). Ultrahigh-sensitive broadband photodetectors based on dielectric shielded MoTe₂/graphene/SnS₂ p–g–n junctions. *Advanced Materials*, 31, 1805656.
- Li, H., Li, Y., Aljarb, A., Shi, Y., & Li, L. J. (2017). Epitaxial growth of two-dimensional layered transition-metal dichalcogenides: Growth mechanism, controllability, and scalability. *Chemical Reviews*, 118(13), 6134–6150.
- Li, K., Du, C., Gao, H., Yin, T., Zheng, L., Leng, J., & Wang, W. (2022). Ultrafast and polarization-sensitive ReS₂/ReSe₂ heterostructure photodetectors with ambipolar photoresponse. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(29), 33589–33597.
- Li, L., Yu, Y., Ye, G. J., Ge, Q., Ou, X., Wu, H., Feng, D., Chen, X. H., & Zhang, Y. (2014). Black phosphorus field-effect transistors. *Nature Nanotechnology*, 9, 372–377.
- Li, Q., Guo, Y., & Liu, Y. (2019). Exploration of near-infrared organic photodetectors. *Chemistry of Materials*, 31(17), 6359–6379.
- Li, S. (2021). Salt-assisted chemical vapor deposition of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *iScience*, 24(11), 103229.

- Li, X., Chen, C., Yang, Y., Lei, Z., & Xu, H. (2020). 2D Re-based transition metal chalcogenides: Progress, challenges, and opportunities. *Advanced Science*, 7(23), 2002323.
- Li, X., Cui, F., Feng, Q., Wang, G., Xu, X., Wu, J., Mao, N., Liang, X., Zhang, Z., Zhang, J., & Xu, H. (2016). Controlled growth of large-area anisotropic ReS₂ atomic layer and its photodetector application. *Nanoscale*, 8, 18956–18962.
- Li, Y.-C., Li, X.-X., Zeng, G., Chen, Y.-C., Chen, D.-B., Peng, B.-F., Zhu, L.-Y., Zhang, D. W., & Lu, H.-L. (2021). High optoelectronic performance of a local-back-gate ReS₂/ReSe₂ heterojunction phototransistor with hafnium oxide dielectric. *Nanoscale*, 13, 14435–14441.
- Li, B., He, Y., Lei, S., Najmaei, S., Gong, Y., Wang, X., ... & Ajayan, P. M. (2015). Scalable transfer of suspended two-dimensional single crystals. *Nano Letters*, 15(8), 5089–5097.
- Liang, S.-J., Cheng, B., Cui, X., & Miao, F. (2020). Van der Waals heterostructures for high-performance device applications: Challenges and opportunities. *Advanced Materials*, 32, 1903800.
- Liao, J., Wu, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Dong, M., Qiu, Z., ... & Zheng, L. (2025). WSe₂/ReS₂ heterojunction for high-temperature photodetectors with high sensitivity and fast response. *Journal of Alloys and Compounds*, 183205.
- Lim, J., Jeon, D., Lee, S., Yu, J. S., & Lee, S. (2019). Nucleation promoted synthesis of large-area ReS₂ film for high-speed photodetectors. *Nanotechnology*, 31(11), 115603.
- Liu, D., Hong, J., Wang, X., Li, X., Feng, Q., Tan, C., ... & Xu, H. (2018). Diverse atomically sharp interfaces and linear dichroism of 1T' ReS₂–ReSe₂ lateral p–n heterojunctions. *Advanced Functional Materials*, 28(47), 1804696.
- Liu, E., Fu, Y., Wang, Y., Feng, Y., Liu, H., Wan, X., ... & Xing, D. (2015). Integrated digital inverters based on two-dimensional anisotropic ReS₂ field-effect transistors. *Nature Communications*, 6, 8089.
- Liu, F., Zheng, S., Chaturvedi, A., Zólyomi, V., Zhou, J., Fu, Q., ... & Liu, Z. (2016). Optoelectronic properties of atomically thin ReSSe with weak interlayer coupling. *Nanoscale*, 8(11), 5826–5834.
- Liu, H., Zhao, J., & Ly, T. H. (2024). Clean transfer of two-dimensional materials: A comprehensive review. *ACS Nano*, 18(18), 11573–11597.
- Liu, Y., Li, X., Guo, Y., Yang, T., Chen, K., Lin, C., ... & Shan, C. (2020). Modulation on the electronic properties and band gap of layered ReSe₂ via strain engineering. *Journal of Alloys and Compounds*, 827, 154364.
- Long, M., Liu, E., Wang, P., Gao, A., Xia, H., Luo, W., Wang, B., Zeng, J., Fu, Y., Xu, K., Zhou, W., Lv, Y., Yao, S., Lu, M., Chen, Y., Ni, Z., You, Y., Zhang, X., Qin, S., Shi, Y., Hu, W., & Xing, D. (2016). Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure. *Nano Letters*, 16(4), 2254–2259.
- Long, M., Wang, P., Fang, H., & Hu, W. (2019). Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors. *Advanced Functional Materials*, 29(19), 1803807.

- Lorchat, E., Froehlicher, G., & Berciaud, S. (2016). Splitting of interlayer shear modes and photon energy dependent anisotropic Raman response in N-layer ReSe₂ and ReS₂. *ACS Nano*, 10(2), 2752–2760.
- Marin, E. G., Perucchini, M., Marian, D., Iannaccone, G., & Fiori, G. (2018). Modeling of electron devices based on 2-D materials. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(10), 4167–4179.
- Martanov, S. G., Zhurbina, N. K., Pugachev, M. V., Duleba, A. I., Akmaev, M. A., Belykh, V. V., & Kuntsevich, A. Y. (2020). Making van der Waals heterostructures assembly accessible to everyone. *Nanomaterials*, 10(11), 2305.
- Marzik, J. V., Kershaw, R., Dwight, K., & Wold, A. (1984). Photoelectronic properties of ReS₂ and ReSe₂ single crystals. *Journal of Solid State Chemistry*, 51(2), 170–175.
- Mathew, M., Shinde, P. V., Samal, R., & Rout, C. S. (2021). A review on mechanisms and recent developments in pn heterojunctions of 2D materials for gas sensing applications. *Journal of Materials Science*, 56(16), 9575–9604.
- Mathew, R. J., Cheng, K. H., Hsu, C. H., Chand, P. K., Paul Inbaraj, C. R., Peng, Y. L., ... & Chen, Y. T. (2022). Near-infrared electroluminescent light-emitting transistors based on CVD-synthesized ambipolar ReSe₂ nanosheets. *Advanced Optical Materials*, 10(8), 2102580.
- Mukherjee, B., Zulkefli, A., Hayakawa, R., & Wakayama, Y., Nakaharai, S. (2019). Enhanced quantum efficiency in vertical mixed-thickness n-ReS₂/p-Si heterojunction photodiodes. *ACS Photonics*, 6(9), 2277–2286.
- Nayak, P. K. (2019). Pulsed-grown graphene for flexible transparent conductors. *Nanoscale Advances*, 1(3), 1215–1223.
- Nazir, G., Rehman, A., Hussain, S., Hakami, O., Heo, K., Amin, M. A., ... & Din, M. A. U. (2022). Bias-modified Schottky barrier height-dependent graphene/ReSe₂ van der Waals heterostructures for excellent photodetector and NO₂ gas sensing applications. *Nanomaterials*, 12(21), 3713.
- Pan, Y., Zheng, T., Gao, F., Qi, L., Gao, W., Zhang, J., ... & Chen, H. (2024). High-performance photoinduced tunneling self-driven photodetector for polarized imaging and polarization-coded optical communication based on broken-gap ReSe₂/SnSe₂ van der Waals heterojunction. *Small*, 20(32), 2311606.
- Pandey, A., Verma, R., & Srivastava, A. (2023). Two-dimensional ReSe₂ nanosheets as a high-performance photocatalyst. *New Journal of Chemistry*, 47(27), 12983–12991.
- Qin, J. K., Shao, W. Z., Li, Y., Xu, C. Y., Ren, D. D., Song, X. G., & Zhen, L. (2017). Van der Waals epitaxy of large-area continuous ReS₂ films on mica substrate. *RSC Advances*, 7(39), 24188–24194.
- Rogalski, A., Martyniuk, P., Kopytko, M., & Hu, W. (2021). Trends in performance limits of the HOT infrared photodetectors. *Applied Sciences*, 11(2), 501.
- Satheesh, P. P., Jang, H. S., Pandit, B., Chandramohan, S., & Heo, K. (2023). 2D rhenium dichalcogenides: From fundamental properties to recent advances in photodetector technology. *Advanced Functional Materials*, 33(16), 2212167.

- Schranhamer, T. F., Sharma, M., Singh, R., & Das, S. (2021). Review and comparison of layer transfer methods for two-dimensional materials for emerging applications. *Chemical Society Reviews*, 50(19), 11032–11054.
- Seo, J., Lee, J., Jeong, G., & Park, H. (2019). Site-selective and van der Waals epitaxial growth of rhenium disulfide on graphene. *Small*, 15, 1804133.
- Shim, J., Oh, A., Kang, D.-H., Oh, S., Jang, S. K., Jeon, J., Jeon, M. H., Kim, M., Choi, C., Lee, J., Lee, S., Yeom, G. Y., Song, Y. J., & Park, J.-H. (2016). High-performance 2D rhenium disulfide (ReS₂) transistors and photodetectors by oxygen plasma treatment. *Advanced Materials*, 28, 6985–6992.
- Silva, B., Rodrigues, J., Sompalle, B., Liao, C.-D., Nicoara, N., Borme, J., Cerqueira, F., Claro, M., Sadewasser, S., Alpuim, P., & Capasso, A. (2021). Efficient ReSe₂ photodetectors with CVD single-crystal graphene contacts. *Nanomaterials*, 11, 1650.
- Singh, E., Singh, P., Kim, K. S., Yeom, G. Y., & Nalwa, H. S. (2019). Flexible molybdenum disulfide (MoS₂) atomic layers for wearable electronics and optoelectronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(12), 11061–11105.
- Splendiani, A., Sun, L., Zhang, Y., Li, T., Kim, J., Chim, C. Y., ... & Wang, F. (2010). Emerging photoluminescence in monolayer MoS₂. *Nano Letters*, 10(4), 1271–1275.
- Sun, X., Alim, E., Wen, Y., Wu, S., Cai, Y., Wei, Z., Wang, Y., Liang, Y., & Zhang, Z. (2023). Controllable growth of large-scale continuous ReS₂ atomic layers. *Crystals*, 13(11), 1548.
- Taffelli, A., Dirè, S., Quaranta, A., & Pancheri, L. (2021). MoS₂ based photodetectors: A review. *Sensors*, 21(8), 2758.
- Tian, H., Tice, J., Fei, R., Tran, V., Yan, X., Yang, L., & Wang, H. (2016a). Low-symmetry two-dimensional materials for electronic and photonic applications. *Nano Today*, 11, 763–777.
- Tian, H., Zhao, H., & Wang, H. (2016b). Novel electronic and photonic properties of low-symmetry two-dimensional materials. In *2016 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)* (pp. 234–238). IEEE.
- Tian, X., & Liu, Y. (2021). Van der Waals heterojunction ReSe₂/WSe₂ polarization-resolved photodetector. *Journal of Semiconductors*, 42, 032001.
- Tongay, S., Sahin, H., Ko, C., Luce, A., Fan, W., Liu, K., Zhou, J., Huang, Y.-S., Ho, C.-H., Yan, J., Ogletree, D. F., Aloni, S., Ji, J., Li, S., Li, J., Peeters, F. M., & Wu, J. (2014). Monolayer behaviour in bulk ReS₂ due to electronic and vibrational decoupling. *Nature Communications*, 5, 3252.
- Varghese, A., Saha, D., Thakar, K., Jindal, V., Ghosh, S., Medhekar, N. V., Ghosh, S., & Lodha, S. (2020). Near-direct bandgap WSe₂/ReS₂ type-II pn heterojunction for enhanced ultrafast photodetection and high-performance photovoltaics. *Nano Letters*, 20(3), 1707–1717.
- Wang, D., Luo, F., Lu, M., Xie, X., Huang, L., & Huang, W. (2019). Chemical vapor transport reactions for synthesizing layered materials and their 2D counterparts. *Small*, 15(40), 1804404.

- Wang, J., Han, J., Chen, X., & Wang, X. (2019). Design strategies for two-dimensional material photodetectors to enhance device performance. *InfoMat*, 1, 33–53.
- Wang, J., Li, T., Wang, Q., Wang, W., Shi, R., Wang, N., ... & Cheng, C. (2020). Controlled growth of atomically thin transition metal dichalcogenides via chemical vapor deposition method. *Materials Today Advances*, 8, 100098.
- Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., & Strano, M. S. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature Nanotechnology*, 7, 699–712.
- Wang, Y., Lai, Z., Tang, S., Wang, J., Zhou, Q., Li, S., ... & Gao, L. (2025). ReS₂/MoSe₂ van der Waals heterostructure photodetectors for polarization imaging and polarization-encoded optical communication. *Small*, 21(34), 2503599.
- Wang, Z., Zeng, P., Hu, S., Wu, X., He, J., Wu, Z., Wang, W., Zheng, P., Zheng, H., & Zheng, L. (2021). Broadband photodetector based on ReS₂/graphene/WSe₂ heterostructure. *Nanotechnology*, 32, 465201.
- Xia, F., Wang, H., & Jia, Y. (2014). Rediscovering black phosphorus as an anisotropic layered material for optoelectronics and electronics. *Nature Communications*, 5, 4458.
- Xie, C., Jiang, S., Zou, X., Sun, Y., Zhao, L., Hong, M., ... & Zhang, Y. (2019). Space-confined growth of monolayer ReSe₂ under a graphene layer on Au foils. *Nano Research*, 12, 149–157.
- Xing, L., Yan, X., Zheng, J., Xu, G., Lu, Z., Liu, L., ... & Jiao, L. (2019). Highly crystalline ReSe₂ atomic layers synthesized by chemical vapor transport. *InfoMat*, 1(4), 552–558.
- Xiong, Y., Chen, H., Zhang, D. W., & Zhou, P. (2019). Electronic and optoelectronic applications based on ReS₂. *Physica Status Solidi RRL*, 13, 1800658.
- Xu, Z. Q., Zhang, Y., Lin, S., Zheng, C., Zhong, Y. L., Xia, X., ... & Bao, Q. (2015). Synthesis and transfer of large-area monolayer WS₂ crystals: Moving toward the recyclable use of sapphire substrates. *ACS Nano*, 9(6), 6178–6187.
- Yan, F., Wei, Z., Wei, X., Lv, Q., & Wang, K. (2018). Toward high-performance photodetectors based on 2D materials: Strategy on methods. *Small Methods*, 2(5), 1700349.
- Yang, X., & Yan, M. (2020). Removing contaminants from transferred CVD graphene. *Nano Research*, 13, 599–610.
- Yao, Y., Li, X., Song, R., Cui, N., Liu, S., Zhang, H., ... & He, J. (2019). The energy band structure analysis and 2 μ m Q-switched laser application of layered rhenium diselenide. *RSC Advances*, 9(25), 14417–14421.
- Yi, M., & Shen, Z. (2015). A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(22), 11700–11715.
- Yu, S., Cho, Y., Lim, J. Y., Kwon, H., Jeong, Y., Kim, J., ... & Im, S. (2019). Advanced Multifunctional Field Effect Devices Using Common Gate for Both 2D Transition-Metal Dichalcogenide and InGaZnO Channels. *Advanced Electronic Materials*, 5(12), 1900730.
- Yu, Z. G., Cai, Y., & Zhang, Y.-W. (2015). Robust direct bandgap characteristics of one- and two-dimensional ReS₂. *Scientific Reports*, 5, 1–9.

- Zhang, E., Jin, Y., Yuan, X., Wang, W., Zhang, C., Tang, L., Liu, S., Zhou, P., Hu, W., & Xiu, F. (2015). ReS₂-based field-effect transistors and photodetectors. *Advanced Functional Materials*, 25, 4076–4082.
- Zhang, J., Duan, L., Zhou, N., Zhang, L., Shang, C., Xu, H., Yang, R., Wang, X., & Li, X. (2023). Modulating the function of GeAs/ReS₂ van der Waals heterojunction with its potential application for short-wave infrared and polarization-sensitive photodetection. *Small*, 19, 2303335.
- Zhao, H., Wu, J., Zhong, H., Guo, Q., Wang, X., & Xia, F., ... & Wang, H. (2015). Interlayer interactions in anisotropic atomically thin rhenium diselenide. *Nano Research*, 8(11), 3651–3661.
- Zhao, S., Dong, B., Wang, H., Wang, H., Zhang, Y., Han, Z. V., & Zhang, H. (2020). In-plane anisotropic electronics based on low-symmetry 2D materials: Progress and prospects. *Nanoscale Advances*, 2(1), 109–139.
- Zhong, J., Zeng, C., Yu, J., Cao, L., Ding, J., Liu, Z., & Liu, Y. (2021). Direct observation of enhanced performance in suspended ReS₂ photodetectors. *Optics Express*, 29, 3567–3574.
- Zhou, T., Yang, M., Wang, J., Chen, X., Yan, Q., Watanabe, K., ... & Hu, Z. (2025). Graphene/h-BN/ReS₂ heterostructure operating in Fowler–Nordheim tunneling regime for polarization-sensitive fast photodetector. *Advanced Electronic Materials*, 11, 2500001.
- Zhu, H., Liu, A., Shan, F., Yang, W., Barrow, C., & Liu, J. (2017). Direct transfer of graphene and application in low-voltage hybrid transistors. *RSC Advances*, 7, 2172–2179.
- Zhu, W., Wei, X., Yan, F., Lv, Q., Hu, C., & Wang, K. (2019). Broadband polarized photodetector based on p-BP/n-ReS₂ heterojunction. *Journal of Semiconductors*, 40, 092.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR

1. Makaleler

- Aydın, B., & Duman, Ç. (2023). Optimization of electrode, interlayer and absorber layers of a Gr/ReS₂/PSi/p-cSi photovoltaic solar cell with SCAPS. *Journal of Electronic Materials*, 52(7), 4809-4821.
- Aydın, B., Yazıcı, İ., Coşkun, A., Turgut, G., Gör Bölen, M., & Duman, Ç. (2025). A Comprehensive Review of Two-Dimensional Rhenium Diselenide (ReSe₂): Fundamentals of Electronic and Optoelectronic Applications. *Journal of Electronic Materials*, 1-24.

2. Bildiriler

- Aydın, B., Yazıcı, İ., Coşkun, A., Turgut, G., Duman, Ç. (2024) Synthesis of Low Symmetry 2D ReSe₂ Flakes Using Chemical Vapor Deposition Method. *3rd Sivas International Conference on Scientific and Innovation Research*, 3(3), 487-494.
- Demir, B. A., Aktuğ, H. A. Ç., Çakmak, B., & Duman, Ç. (2025). Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi ile Üretilmiş Tek Tabakalı Grafen Filmlerin Islak Transferinin Optimizasyonu. *11th International Symposium on Intelligent Technologies in Engineering and Science (ISITES 2025)*, 6(2), 443-449.

3. Diğer Makaleler

- Aydın, B., & Duman, Ç. (2022). Comparison of OOK-RZ and 4-PPM performances in Li-Fi systems using LED arrays. *Optics & Laser Technology*, 153, 108247. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108247>
- Aydın, B., & Duman, Ç. (2022). Examination of OOK modulation schemes in Li-Fi systems. *Optik*, 270, 169996.
- Aydın, B. (2025). Photovoltaic investigation of diamane emitter layer with AFORS-HET. *Optics & Laser Technology*, 186, 112696.
- Karabulut, N., Aydın, B., & Duman, Ç. (2025). Numerical simulation of a graphene/n-WS₂/a-Si: H (I)/p-cSi/Ag HIT solar cell. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 33(5), 055012.
- Karabulut, N., Demir, B. A., Karaçam, S., Duman, Ç., & Bölen, M. G. (2025). Fundamentals of two-dimensional Ca₂Nb₃O₁₀ (CNO). *Journal of Nanoparticle Research*, 27(11), 289.

4. Diğer Bildiriler

- Aydın, B., Duman, Ç. (2021). An Advanced Visible Light Communication Technique: Li-Fi (Light Fidelity). *1st International Conference on Advances in Engineering, Architecture, Science and Technology*, 1(1), 32-38.

- Aydın, B., Duman, Ç. (2022). Investigation of Two Dimensional Tungsten Disulfide as a Buffer Layer for Solar Cells. *4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 4(1), 811-816.
- Karabulut, N., Aydın, B., Duman, Ç. (2023). Numerical Simulation Of Graphene/n-WS₂/a-Si:H(i)/p-cSi/Ag Hit Solar Cells. *9th International IFS and Contemporary Mathematics and Engineering Conference*, 7(8), 255-256.

