



**METAL OKSİT İNORGANİK  
MALZEMELERİN GaAs HÜCRE  
TEKNOLOJİSİNE ELEKTRON SEÇİCİ  
YAYICI KATMAN OLARAK  
ENTEGRASYONU**

**Doktora Tezi**

**Elif YILMAZ**

**Eskişehir 2024**

**METAL OKSİT İNORGANİK MALZEMELERİN GaAs HÜCRE  
TEKNOLOJİSİNE ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMAN OLARAK  
ENTEGRASYONU**

**Elif YILMAZ**

**Doktora Tezi**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Haziran 2024**

*Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen 22DRP402 no.lu proje,  
TÜBİTAK 120F222 no.lu bilimsel araştırma projesi ve YÖK 100/2000 Doktora Bursu  
kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Elif YILMAZ'ın METAL OKSİT İNORGANİK MALZEMELERİN GaAs HÜCRE TEKNOLOJİSİNE ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMAN OLARAK ENTEGRASYONU başlıklı çalışması 13/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Kimya Mühendisliği Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvan Adı Soyadı

### İmza

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| Üye | : Doç. Dr. Mustafa KULAKCI     |
| Üye | : Prof. Dr. Uğur SERİNCAN      |
| Üye | : Prof. Dr. Kadir ERTÜRK       |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Şahin COŞKUN  |
| Üye | : Dr. Öğr. Üyesi Burcu ARPAPAY |

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

13/06/2024

## DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Elif YILMAZ, METAL OKSİT İNORGANİK MALZEMELERİN GaAs HÜCRE TEKNOLOJİSİNE ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMAN OLARAK ENTEGRASYONU başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

**ÖZET**  
**METAL OKSİT İNORGANİK MALZEMELERİN GaAs HÜCRE**  
**TEKNOLOJİSİNE ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMAN OLARAK**  
**ENTEGRASYONU**

Elif YILMAZ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2024

Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Son yıllarda, elektron seçici taşıyıcı kontaklar (ESC), yüksek performanslı güneş hücrelerinde elektron taşıyıcı ayrımı için geleneksel katkılı p-n eklem güneş hücrelerine etkili bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu tez kapsamında ilk defa, ELO yöntemi ile üretilen esnek ince film GaAs güneş hücresine ESC katmanı entegre edilmiştir.  $\text{TiO}_2$  ve ZnO metal oksitler ESC katmanı olarak bu hücrelerde kullanılmıştır. Tezde önerilen aygıt yapısı ve üretim yaklaşımı, epitaksiyel hücre büyütmenin zorluğunu kısmi olarak azaltırken, genel hücre üretim maliyet ve fabrikasyon süreçlerinde konvansiyonel yaklaşımlara göre daha verimli ve maliyet etkin hücrelerin daha kolay bir şekilde üretilmesini sağlayacak potansiyele sahiptir.

Tez kapsamında, p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ , p-GaAs/ZnO ve p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO aygıt yapıları için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, n-GaAs yayıcı katmanı yerine ince  $\text{TiO}_2$  veya ZnO tabakalarının kullanılmasının, GaAs güneş hücrelerinde elektron seçiciliğini artırarak yüksek verimliliğe yol açtığını göstermektedir. Herhangi bir yansıtma önleyici katman kullanılmadan yapılan hesaplamalarda dahi, GaAs/ESC hücrelerden p-GaAs/ $\text{TiO}_2$  için %29,3, p-GaAs/ZnO için %27,2 ve p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO için %28,8 gibi yüksek dönüşüm verimi elde edilebileceği gösterilmiştir. İyi bir yansıma önleyici katmanla bu değerler %32 limitine yaklaşabilmektedir.

Teorik hesapları yapılan bu hücre yapılarından ilk defa esnek ince film GaAs/ESC hücre fabrikasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Ancak, fabrikasyonu gerçekleştirilen bu hücrelerden teorik beklentinin aksine çok yüksek verim ölçülememiştir. Deneysel olarak elde edilen en yüksek verimlilik değeri %2,23 seviyelerinde kalmıştır. Fabrikasyon süreçlerinin ve ESC kaplama yöntemlerinin sebep olduğu çok düşük paralel ve çok yüksek seri direnç üretilen hücrelerin özellikle açık devre voltajı ve dolum faktörlerinin çok düşük olmasına yol açarak hücre performansını limitlemiştir.

**Anahtar Sözcükler:** GaAs güneş hücresi, Elektron seçici kontak, Metal oksit, Epitaksiyel film kaldırma.

## ABSTRACT

### INTEGRATION of METAL OXIDE INORGANIC MATERIALS into GaAs CELL TECHNOLOGY as ELECTRON SELECTIVE EMITTER LAYER

Elif YILMAZ

Department of Chemical Engineering

Programme in Chemical Technologies

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2024

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa KULAKCI

In recent years, electron selective carrier contacts (ESC) have emerged as an effective alternative to doped p-n heterojunction solar cells. In this thesis study, ESC layers were integrated into a flexible thin-film GaAs solar cell fabricated by the ELO method for the first time.  $\text{TiO}_2$  and ZnO were used as ESC layers. The proposed device structure reduces the complexity and cost of epitaxially grown cells while enabling the production of high-efficiency GaAs solar cells that are easy to fabricate.

Within the scope of this thesis, simulations were performed for p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ , p-GaAs/ZnO and p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO hibride device structures. The simulation results show that the use of thin  $\text{TiO}_2$  or ZnO layers instead of n-GaAs emitter layer improves the electron selectivity in GaAs solar cells, leading to high efficiency. Even without any anti-reflection layer, calculations show that high conversion efficiencies of 29.3% for p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ , 27.2% for p-GaAs/ZnO and 28.8% for p-GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO can be obtained from GaAs/ESC cells. With a good anti-reflection layer, these values can approach the 32% limit.

From these theoretically calculated cell structures, flexible thin film GaAs/ESC cells were successfully fabricated and characterized for the first time. However, contrary to the theoretical expectation, very high efficiency could not be measured from these fabricated cells. The highest efficiency value obtained experimentally was 2.23%. The very low shunt and very high series resistance caused by the fabrication processes and ESC coating methods led to very low open circuit voltage and fill factors of the fabricated cells, limiting the cell performance.

**Keywords:** GaAs solar cell, Electron selective contact, Metal oxides, Epitaxial lift-off.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerekleşmesinde yol göstericiliği, destekleri, motivasyon konuşmaları, dostlukları ve sevgileriyle büyük katkı sağlayan ve değer verdiğim pek çok kişi bulunmaktadır. Bu vesileyle, hepsine en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım süresince büyük özveriyle yönlendiren, bilgi birikiminden faydalandığım, yapıcı eleştirileriyle beni her konuda destekleyen, büyük anlayış ve rehberliğiyle kendisinden çok şey öğrendiğim danışman hocam Doç. Dr. Mustafa KULAKCI'ya teşekkür ederim. Nanoboyut Araştırma Grubu'na dahil ederek çalışmalarımı gerçekleştirme imkânı sunan, makale yazma sürecinde çok şey öğrendiğim, değerli öneri ve değerlendirmeleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Uğur SERİNCAN'a çok teşekkür ederim. Çalışmalarımda malzeme ihtiyacı ve ölçüm konularında çözümler sunan, değerli bilgi ve katkılarından dolayı Dr. Öğr. Görevlisi Burcu ARPAPAY'a teşekkür ederim. Bilimsel tartışma ve değerlendirmeleriyle değerli katkılarından dolayı Doktora Tez İzleme Komitesi Üyesi Dr. Öğr. Görevlisi Şahin COŞKUN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın her aşamasında desteğini, anlayışını ve sabrını esirgemeyen, aklıma takılan konuları sabırla anlatan, değerli katkı ve yardımları için Onur ŞENEL'e sonsuz teşekkür ederim. Laboratuvarıda çalışmalarım sırasında yardımcı olan, fikir ve önerilerini paylaşan ve ölçümler sırasında destek veren Hazal ZAIMLER'e teşekkür ederim. Ölçümler konusunda yardımlarını esirgemeyen, değerli fikir ve önerilerini paylaşmaktan çekinmeyen Ayşe Aygöl ERGÜRHAN'a içten teşekkürlerimi sunarım. Değerli çalışma arkadaşlığı için Erinç ERENOğLU'na teşekkür ederim. Doktora sürecinde tanımaktan memnun olduğum Ali BÜYÜKPINAR, Furkan AZİM, Muhammet AKTAŞ, Orkun ERGÜRHAN'a ve ölçümler konusunda yardımcı olan Uğur YORULMAZ'a teşekkür ederim.

Doktora eğitim sürecine en başından beri birlikte başladığımız ve beni en çok anladığını düşündüğüm sevgili arkadaşım Aylin KARAKAŞ'a, her zaman moral ve motivasyon veren sevgili arkadaşım Aslıhan YEMENİCİ'ye, hoş sohbeti ve arkadaşlığı için Fatma ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Son olarak, bütün eğitim süreçlerimde bana destek veren, güvenen, sonsuz sabır ve anlayış gösteren anneme, babama ve dedeme teşekkür ederim. Hayatım boyunca her zorlukta yanımda olan, anlayış gösteren ve desteklerini esirgemeyen sevgili ablam Dilek ve sevgili kardeşim Mine'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doktorayı bitireceğime inanarak başından beri sözleriyle beni destekleyen İsmail Abi'ye çok teşekkür ederim. Dünya tatlısı neşe kaynağım, yeğenim Gülce'ye teşekkür ederim. Tez aşaması döneminde kaybettiğim canım babaannemin koşulsuz sevgisi ve ilkokuldan beri eğitimime verdiği destek sayesinde okuyabildim, ona sonsuz minnettarım. Sevdiklerimin desteği olmadan bu tezin gerçekleşmesi mümkün olmazdı.

Elif YILMAZ



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Elif YILMAZ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....                                                         | II   |
| DANIŞMAN ONAYI .....                                                               | III  |
| ÖZET .....                                                                         | IV   |
| ABSTRACT.....                                                                      | V    |
| TEŞEKKÜR .....                                                                     | VI   |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....                                   | VIII |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                   | IX   |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                              | XI   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                              | XII  |
| GÖRSELLER DİZİNİ .....                                                             | XV   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                                                | XVI  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                     | 1    |
| 1.1. Tezin İçeriği .....                                                           | 7    |
| 2. III-V GRUBU GAAS GÜNEŞ HÜCRELERİ .....                                          | 8    |
| 2.1. III-V Grubu Yarı İletkenler .....                                             | 8    |
| 2.2. III-V Grubu Güneş Hücreleri .....                                             | 10   |
| 2.2.1. Tek eklemli III-V grubu güneş hücreleri .....                               | 10   |
| 2.2.2. Çok eklemli III-V grubu güneş hücreleri.....                                | 12   |
| 2.3. GaAs .....                                                                    | 15   |
| 2.4. GaAs Güneş Hücreleri.....                                                     | 17   |
| 2.5. Esnek İnce Film GaAs Güneş Hücreleri .....                                    | 19   |
| 2.6. Epitaksiyel Film Kaldırma .....                                               | 22   |
| 3. ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMANLARIN GAAS GÜNEŞ<br>HÜCRELERİNE ENTEGRASYONU ..... | 24   |
| 3.1. Elektron Seçici Katman için İnorganik Metal Oksitler .....                    | 25   |
| 3.2. Literatür Özeti.....                                                          | 26   |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3. Elektron Seçici Katmanlarda Elektron Taşınımı.....            | 29 |
| 4. GAAS-ESC KATMANLI GÜNEŞ HÜCRESİ SİMÜLASYONU .....               | 32 |
| 4.1. Optik ve Elektriksel Simülasyon.....                          | 32 |
| 4.2. GaAs/TiO <sub>2</sub> Güneş Hücresi Simülasyonu .....         | 36 |
| 4.3. GaAs/ZnO Güneş Hücresi Simülasyonu .....                      | 40 |
| 4.4. GaAs/TiO <sub>2</sub> /ZnO Güneş Hücresi Simülasyonu .....    | 42 |
| 4.5. p-n Eklem Referans GaAs Güneş Hücresi Simülasyonu.....        | 44 |
| 5. GÜNEŞ HÜCRESİ FABRİKASYON VE KARAKTERİZASYONU .....             | 48 |
| 5.1. Aygıt Üretim ve Fabrikasyon Süreçleri .....                   | 48 |
| 5.1.1. Alttaş hazırlama .....                                      | 48 |
| 5.1.2. Epitaksiyel film kaldırma (ELO) .....                       | 49 |
| 5.1.3. Fotolitografi .....                                         | 51 |
| 5.1.4. ESC ve TCO katmanların kaplanma süreçleri: .....            | 53 |
| 5.1.5. Elektron demet ışıını ve termal buharlaştırma.....          | 54 |
| 5.1.6. Kenar aşındırma.....                                        | 54 |
| 5.1.7. Termal Tavlama .....                                        | 55 |
| 5.2. Aygıt Karakterizasyonu.....                                   | 56 |
| 5.2.1. Akım-Voltaj Ölçümleri .....                                 | 56 |
| 5.2.2. Kuantum verim ölçümleri .....                               | 57 |
| 6. BULGU VE TARTIŞMA .....                                         | 60 |
| 6.1. TiO <sub>2</sub> Katmanlı GaAs Güneş Hücresi .....            | 62 |
| 6.2. ZnO Katmanlı GaAs Güneş Hücresi.....                          | 70 |
| 6.3. TiO <sub>2</sub> /ZnO İki Katman ESC GaAs Güneş Hücresi ..... | 73 |
| 7. SONUÇ .....                                                     | 77 |
| KAYNAKÇA.....                                                      | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                           |    |

## TABLÖLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1.</b> GaAs'ın, 300 K'de fiziksel ve elektriksel özellikleri [23].                                                                                                                                                                                                                    | 16 |
| <b>Tablo 4.1.</b> GaAs/ESC hibrit hücre yapısının GaAs tabanlı katmanlarının temel simülasyon parametreleri                                                                                                                                                                                      | 35 |
| <b>Tablo 4.2.</b> GaAs/ESC hibrit hücre yapısının ESC ve TCO katmanlarının temel simülasyon parametreleri                                                                                                                                                                                        | 35 |
| <b>Tablo 4.3.</b> GaAs soğurucu katmanın $1 \times 10^{16}$ - $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ arası farklı katkı yoğunluklarının ESC( $\text{TiO}_2$ ) katmanı 5 nm kalınlıkta sabit tutulan hibrit hücreye etkisinin performans parametreleri.                                                | 37 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Farklı $\text{TiO}_2$ katman kalınlıklarında GaAs/ $\text{TiO}_2$ güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.                                                                                                                                | 40 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Farklı ZnO katman kalınlıklarında GaAs/ZnO güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.                                                                                                                                                       | 42 |
| <b>Tablo 4.6.</b> Farklı $\text{TiO}_2$ ve ZnO katman kalınlıklarında GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.                                                                                                                    | 44 |
| <b>Tablo 4.7.</b> GaAs/ESC hibrit esnek ince film hücreler ve p-n eklem GaAs esnek ince film hücrelerin performans parametrelerinin karşılaştırılması. (ilk gruptaki 4 hücrede ön yüzey yansımaları hesaplara dahil edilmiş, son gruptaki 4 hücrede hücre yüzeyi yansımaları olarak alınmıştır). | 46 |
| <b>Tablo 5.1.</b> RF magnetron saçtırma yöntemi ile kaplama parametreleri                                                                                                                                                                                                                        | 54 |
| <b>Tablo 6.1.</b> Alttaş tabanlı GaAs/ESC ( $\text{TiO}_2$ ) kontrol güneş hücrenin I-V ölçümünden elde edilen hücre parametreleri.                                                                                                                                                              | 63 |
| <b>Tablo 6.2.</b> Esnek ince film GaAs/ $\text{TiO}_2$ güneş hücrelerin I-V ölçümünden elde edilen hücre parametreleri.                                                                                                                                                                          | 66 |
| <b>Tablo 6.3.</b> Farklı kalınlıklarda ZnO katmanı içeren alttaş tabanlı güneş hücresi ölçüm sonuçları                                                                                                                                                                                           | 71 |
| <b>Tablo 6.4.</b> Alttaş tabanlı ve esnek ince film iki katman ESC GaAs/ $\text{TiO}_2$ /ZnO güneş hücrelerinin hücre parametreleri.                                                                                                                                                             | 75 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1.</b> NREL tarafından yayınlanan farklı güneş hücresi teknolojilerinin verimlilik değerlerinin karşılaştırmalı olarak zamanla değişimi [1].                                                                                                                  | 3  |
| <b>Şekil 2.1.</b> III-V yarı iletkenlerin bant aralığı enerjisi ve örgü sabiti [5].                                                                                                                                                                                      | 9  |
| <b>Şekil 2.2.</b> Güneş hücrelerinde kullanılan bazı yarıiletkenlerin dalga boyuna göre soğurma katsayısı [6].                                                                                                                                                           | 10 |
| <b>Şekil 2.3.</b> Bant aralığının bir fonksiyonu olarak tek eklemli güneş hücresi için teorik Shockley-Queisser (SQ) verimlilik limiti (düz çizgi) [7-8].                                                                                                                | 11 |
| <b>Şekil 2.4.</b> (sol) GaInP/GaInAs/Ge üçlü eklemli güneş hücresi yapısı (sağ) Dalga boyuna bağlı AM1.5 güneş spektrumunun üç eklemli güneş hücresi tarafından kullanılabilen kısımları grafiği [9].                                                                    | 12 |
| <b>Şekil 2.5.</b> Farklı III-V güneş hücresi konseptlerinin şematik gösterimi [9].                                                                                                                                                                                       | 14 |
| <b>Şekil 2.6.</b> GaAs'ın kristal yapısı, “a” örgü sabitidir [22]                                                                                                                                                                                                        | 15 |
| <b>Şekil 2.7.</b> GaAs'ın enerji-bant yapısı, Eg enerji bant aralığı, k:dalga vektörü [22].                                                                                                                                                                              | 16 |
| <b>Şekil 2.8.</b> Epitaksiyel film katmanlarının yer aldığı geleneksel p-n eklem GaAs güneş hücre yapısı                                                                                                                                                                 | 18 |
| <b>Şekil 2.9.</b> ELO yöntemi için epitaksiyel büyütme yapısı                                                                                                                                                                                                            | 22 |
| <b>Şekil 2.10.</b> ELO prosesinin şematik gösterimi [41].                                                                                                                                                                                                                | 23 |
| <b>Şekil 3.1.</b> Geleneksel p-n (p-i-n) eklem güneş hücresine alternatif ESC içeren güneş hücresi.                                                                                                                                                                      | 25 |
| <b>Şekil 3.2.</b> ZnO/GaAs heteroeklem güneş hücresinin enerji bandı diyagramı                                                                                                                                                                                           | 30 |
| <b>Şekil 3.3.</b> TiO <sub>2</sub> ve GaAs hetero eklem oluşturmada önceki enerji bant yapısı (sol), TiO <sub>2</sub> /GaAs eklemi oluştuktan sonraki bant diyagramı (sağ).                                                                                              | 31 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Teorik hesaplamalarda kullanılan hibrit GaAs/ESC hücre yapılarının yan kesitten görünümü: (a) GaAs güneş hücre yapısı-1, tek katman ESC (ESC: TiO <sub>2</sub> veya ZnO) (b) GaAs güneş hücresi yapısı-2, çift katman ESC (ESC: TiO <sub>2</sub> /ZnO) | 34 |
| <b>Şekil 4.2.</b> GaAs soğurucu katmanın $1 \times 10^{16}$ - $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ arası farklı katkı yoğunluklarının ESC(TiO <sub>2</sub> ) katmanı 5 nm kalınlıkta sabit tutulan hibrit hücreye etkisinin J-V eğrisi.                                     | 37 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Farklı TiO <sub>2</sub> katman kalınlıklarında GaAs/ESC hücrelerin teorik simülasyondan elde edilen eğrileri :(a) J-V eğrileri, (b) Dönüşüm                                                                                                            |    |

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| verimi-FF (c) Kuantum verimi (QE) (d) Enerji bant hizalanması<br>diyagramı. ....                                                                                                                                                        | 38 |
| <b>Şekil 4.4.</b> Farklı ZnO katman kalınlıklarında GaAs/ESC hücrelerin teorik<br>simülasyondan elde edilen eğrileri :(a) J-V eğrileri, (b) Dönüşüm<br>verimi-FF (c) Kuantum verimi (QE) (d) Enerji bant hizalanması<br>diyagramı. .... | 41 |
| <b>Şekil 4.5.</b> GaAs/TiO <sub>2</sub> /ZnO güneş hücresi için (a) J-V eğrisi. (b) Kuantum verimi<br>(QE) (c) Enerji bant hizalanması diyagramı. ....                                                                                  | 43 |
| <b>Şekil 4.6.</b> p-n eklem esnek ince film GaAs güneş hücresi simülasyonu sonucu elde<br>edilen; (a) J-V eğrisi (b) Kuantum verimi (QE) eğrisi.....                                                                                    | 45 |
| <b>Şekil 4.7.</b> GaAs/ESC hibrit esnek ince film hücreler ve p-n eklem GaAs esnek<br>ince film hücrenin teorik simülasyondan elde edilen (a) J-V (b)<br>Kuantum verimi (QE) eğrileri.....                                              | 46 |
| <b>Şekil 5.1.</b> GaAs yarı hücrelerin epitaksiyel büyütme yapıları a) Esnek ince film<br>ELO hücre yapısı b) Alttaş tabanlı hücre yapısı. ....                                                                                         | 48 |
| <b>Şekil 5.2.</b> Alttaş ve esnek taşıyıcıyı metal bağla yapıştırma prosesi .....                                                                                                                                                       | 49 |
| <b>Şekil 5.3.</b> ELO yönteminin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                | 50 |
| <b>Şekil 5.4.</b> GaAs yarı hücre yapısı üzerine kaplanacak ESC ve TCO katman<br>alanının litografik yöntemle tanımlama süreci. ....                                                                                                    | 52 |
| <b>Şekil 5.5.</b> Gelen ışığın dalga boyuna bağlı güneş hücrelerinde dış kuantum verimi<br>grafiği ve kuantum veriminde meydana gelen kayıpların gösterimi [6].....                                                                     | 58 |
| <b>Şekil 6.1.</b> Alttaş tabanlı GaAs/ESC hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış akım<br>yoğunluğu-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri (a,b) TiO <sub>2</sub> kalınlığı 7,5<br>nm (c,d) TiO <sub>2</sub> kalınlığı 10 nm.....            | 63 |
| <b>Şekil 6.2.</b> Alttaş tabanlı p-GaAs/n-TiO <sub>2</sub> heteroeklem güneş hücresinin kuantum<br>verimi eğrisi ve hücre yapısı ön yüzeyinde hesaplanan yansıma eğrisi<br>(iç şekil) .....                                             | 64 |
| <b>Şekil 6.3.</b> Esnek ince film GaAs/TiO <sub>2</sub> hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış<br>akım-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri .....                                                                                         | 66 |
| <b>Şekil 6.4.</b> Esnek ince film GaAs/TiO <sub>2</sub> heteroeklem güneş hücresinin kuantum<br>verimlilik eğrisi.....                                                                                                                  | 68 |
| <b>Şekil 6.5.</b> Alttaş tabanlı GaAs/TiO <sub>2</sub> hücrenin MgF <sub>2</sub> ARC kaplama öncesi ve<br>sonrası kuantum verimlilik eğrisi, hücre yapısı yüzeyinde hesaplanan                                                          |    |

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| yansımaya eğrisi ve 100 nm $MgF_2$ kaplandıktan sonra hesaplanan yansımaya eğrisi (iç şekil). ....                                                                                       | 69 |
| <b>Şekil 6.6.</b> Alttaş tabanlı GaAs/ESC hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış akım yoğunluğu-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri (a) ZnO kalınlığı 7,5 nm (b) ZnO kalınlığı 6 nm ..... | 71 |
| <b>Şekil 6.7.</b> Alttaş tabanlı GaAs/ZnO hetero eklem güneş hücresinin kuantum verimlilik ve hesaplanan yüzey yansımaya eğrileri. ....                                                  | 73 |
| <b>Şekil 6.8.</b> İki katman $TiO_2/ZnO$ ESC yapılı GaAs hücrelerin AM1.5G spektrumunda alınmış I-V eğrileri: Alttaş tabanlı hücreler (a,b,c) ve esnek ince film hücre (d).....          | 74 |
| <b>Şekil 6.9.</b> Alttaş ve esnek tabanlı GaAs/ $TiO_2/ZnO$ güneş hücreleri için kuantum verimlilik ve hesaplanan yüzey yansımaya eğrisi .....                                           | 76 |

## GÖRSELLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Görsel 2.1.</b> (sol) yoğunlaştırıcı modül (AZUR SPACE, Fraunhofer ISE) [20],<br>(sağ) SpaceX uzay aracındaki ISS Roll Out Solar Array (ROSA)<br>güneş dizileri [21]. ....                                                                                             | 15 |
| <b>Görsel 2.2.</b> MIR Uzay İstasyonu'nun Ioffe Enstitüsü tarafından geliştirilen<br>AlGaAs/GaAs güneş hücrelerine dayalı PV dizileri [26]. ....                                                                                                                          | 18 |
| <b>Görsel 2.3.</b> ELO filmin aktarıldığı esnek alt tabaka ve ELO işleminden sonra<br>yeniden kullanılabilen büyümeye hazır alttaş (sol), ELO yöntemi ile<br>esnek alt tabaka üzerine üretilen ince film güneş hücresi (sağ) [30]. ....                                   | 20 |
| <b>Görsel 5.1.</b> Yarı hücre yapısı bulunan örneğin polyamide yapıştırma sürecinden<br>görüntüler :(a) alttaş (sol), polyamid (orta) ve örneğin polyamide<br>yapıştırılmış hali (a-sol ve b). ....                                                                       | 50 |
| <b>Görsel 5.2.</b> ELO süreci ile polyamide aktarılan yarı hücre yapısı: polyamide<br>aktarılan esnek ince film (sol) ve geride kalan üzerinden kaldırıldığı<br>GaAs alttaş (10x10 mm <sup>2</sup> ), polyamide aktarılan esnek ince filmin ayna<br>görüntüsü (sağ). .... | 51 |
| <b>Görsel 5.3.</b> Ön ızgara kontak metalizasyonu için fotolitografik maske olarak<br>kullanılan Si gölge maske (shadow maske) ....                                                                                                                                       | 53 |
| <b>Görsel 5.4.</b> ESC ve TCO kaplı esnek ince film hibrit hücre yapısı: kenar<br>izolasyonu öncesi (sol), kenar izolasyonu sonrası (sağ). ....                                                                                                                           | 55 |
| <b>Görsel 5.5.</b> Fabrikasyonu tamamlanan GaAs/ESC güneş hücreleri (a) ELO tabanlı<br>(b) Alttaş tabanlı ....                                                                                                                                                            | 56 |
| <b>Görsel 6.1.</b> (a) üzerinde girinti-çıkıntı olan Au kaplı polyamid (b-d) polyamid ve<br>üzerine nakledilen ELO GaAs yarı hücre film. ....                                                                                                                             | 61 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                     |                                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Å                   | : Angstrom                          |
| $\epsilon$          | : Elektriksel geçirgenlik           |
| $\lambda$           | : Dalgaboyu                         |
| $h$                 | : Planck sabiti                     |
| $\mu\text{m}$       | : Mikrometre                        |
| nm                  | : Nanometre                         |
| $\eta$              | : Dönüşüm verimi                    |
| $\Omega$            | : Ohm                               |
| $\chi$              | : Elektron ilgisi                   |
| c                   | : Işık hızı                         |
| a-Si                | : Amorf Silisyum                    |
| Ag                  | : Gümüş                             |
| Al                  | : Alüminyum                         |
| AlAs                | : Alüminyum Arsenik                 |
| ALD                 | : Atomik Katman Biriktirme          |
| AlGaInP             | Alüminyum Galyum İndiyum Fosfit     |
| AlGaSb              | : Alüminyum Galyum Antimonit        |
| ARC                 | : Yansıma Önleyici Kaplama          |
| As                  | : Arsenik                           |
| Au                  | : Altın                             |
| AZO                 | : Alüminyum-katkılanmış çinko oksit |
| Be                  | : Berilyum                          |
| BSF                 | : Arka Yüzey Alanı                  |
| CdS                 | : Kadminyum Selenit                 |
| CdTe                | : Kadminyum Tellürit                |
| CIGS                | : Bakır İndiyum Galyum Selenit      |
| CSVT                | : Yakın aralıklı buhar taşınımı     |
| Cu                  | : Bakır                             |
| CuI                 | : Bakır iyodür                      |
| CuInSe <sub>2</sub> | : Bakır indiyum diselenit           |

|          |                                                |
|----------|------------------------------------------------|
| c-Si     | : Kristal Silisyum                             |
| $E_g$    | : Bant aralığı enerjisi                        |
| ELO      | : Epitaksiyel Lift-off                         |
| ESC      | : Elektron Seçici Kontak                       |
| EQE      | : Harici Kuantum Verimi                        |
| FF       | : Dolum Faktörü                                |
| Ga       | : Galyum                                       |
| GaAs     | : Galyum Arsenit                               |
| GaInAs   | : Galyum İndiyum Arsenit                       |
| Ge       | : Germenyum                                    |
| HCl      | : Hidroklorik asit                             |
| HF       | : Hidroflorik asit                             |
| $I_{sc}$ | : Kısa devre akımı                             |
| I-V      | : Akım-voltaj                                  |
| In       | : İnP                                          |
| InGaP    | : İndiyum Galyum Fosfit                        |
| InP      | : İndiyum Fosfat                               |
| ITO      | : İndiyum Kalay Oksit                          |
| IQE      | : İç Kuantum Verimi                            |
| $J_n$    | : Elektron akım yoğunluğu                      |
| $J_p$    | : Deşik akım yoğunluğu                         |
| $J_{sc}$ | : Akım yoğunluğu                               |
| LED      | : Işık yayan diyotlar                          |
| $\mu_n$  | : Elektron mobilitesi                          |
| $\mu_p$  | : Deşik mobilitesi                             |
| MBE      | : Moleküler Demet Epitaksi                     |
| MOCVD    | : Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma         |
| $N_A$    | : Alıcı katman katkı yoğunluğu                 |
| $N_D$    | : Donör ya da verici katman katkı yoğunluğu    |
| $N_c$    | : İletim bandı durum yoğunluğu                 |
| $N_v$    | : Değerlik bandı durum yoğunluğu               |
| NREL     | : ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı |
| P        | : Fosfor                                       |

|          |                                            |
|----------|--------------------------------------------|
| $p$      | : Giren ışığın gücü                        |
| PCE      | : Güç dönüşüm verimi                       |
| Pt       | : Platin                                   |
| PV       | : Fotovoltaik                              |
| PVD      | : Fiziksel buhar biriktirme                |
| R        | : Yansıma                                  |
| $R_n$    | : Elektronların net yeniden birleşme oranı |
| $R_p$    | : Deşiklerin net yeniden birleşme oranı    |
| $R_s$    | : Seri direnç                              |
| $R_{sh}$ | : Paralel direnç (şönt direnç)             |
| RTP      | : Hızlı Termal Tavlama                     |
| Sb       | : Antimon                                  |
| SCAPS-1D | : 1D Solar Cell Capacitance Simulator      |
| Si       | : Silisyum                                 |
| SR       | : Spektral tepki                           |
| TCO      | : Şeffaf İletken Oksit                     |
| TF-VLS   | : İnce-Film Buhar Sıvı Katı                |
| $TiO_2$  | : Titanyum dioksit                         |
| UPS      | : Ultraviyole Fotoelektron Spektroskopisi  |
| $V_{OC}$ | : Açık devre voltajı                       |
| $WO_3$   | : Tungsten oksit                           |
| XPS      | X-ray Fotoelektron Spektroskopisi          |
| ZnO      | : Çinko oksit                              |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı, hızla artan dünya nüfusu ve endüstriyel gelişmelerle birlikte önemli bir sorun haline gelmiştir. Fosil yakıtların sınırlı rezervleri, çevresel etkileri ve sürdürülemez yapısı, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda, güneş enerjisi temiz, sürdürülebilir ve neredeyse sonsuz bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi farklı şekillerde kullanılabilirken, son yıllarda güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik teknolojilerin kullanımı hızla artarak yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yaygınlaşmanın en önemli sebebi yıllar içinde fotovoltaik sistemlerin özellikle güneş hücresi üretim maliyetleri düşerken dönüşüm verimliliklerinin de endüstriyel hale gelen yeni hücre teknolojileriyle artırılması sayesinde olmuştur. Günümüzde fotovoltaik teknolojilerden enerji üretim maliyeti konvansiyonel teknolojilerle kolayca rekabet edebilecek seviyeye ulaşmıştır. Bu teknolojilerin hem daha ucuz ve hem de daha yaygın hale gelerek, gelecekteki enerji arzının ve güvenliğinin sağlanması için daha ucuz ve daha verimli güneş hücrelerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Her ne kadar tarihi 1800'lü yıllara kadar gitse de, modern anlamda güneş hücrelerinin başlangıcı olarak 1954 yılında Bell Laboratuvarlarında ilk p-n eklem silisyum (Si) güneş hücrelerinin başarılı bir şekilde üretilmesi kabul edilebilir. Si üzerinden 70 yıl önce başlayan hücre teknolojisi yoğun araştırma geliştirme faaliyetleriyle uydu-uzay kullanımının ötesinde yeryüzü uygulamaları için en önemli ve maliyet etkin teknolojilerden biri haline gelmiştir. Güneş hücreleri günümüzde gerek endüstriyel olarak pratik uygulamalarda yer bulmuş ve gerekse araştırma geliştirme aşamasında olan farklı malzeme ve üretim teknolojilerinin kullanıldığı disiplinler arası çok büyük bir araştırma ve uygulama alanı haline evrilmiştir. Hem malzeme teknolojisindeki gelişmeler ve hem de farklı malzeme teknolojilerinin bir araya getirilmesine dayalı yeni hücre mimarisi ve üretim süreçleriyle hücre verimlilikleri her geçen gün artmaya devam etmektedir. Fotovoltaik hücrelerin performansları, güç dönüşüm verimliliği gibi birçok değer açısından farklılık göstermektedir; bu değerlerden en önemlisi, gelen optik güç başına üretilen elektrik gücüdür. Verimlilik değerlerindeki ilerlemeler 1976 yılından itibaren, NREL (ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) farklı hücre teknolojilerinin çoğu için düzenli bir şekilde yıllık bir çizelge olarak yayınlanmaktadır [1]. Şekil 1.1'de mevcut hücre teknolojilerinden elde edilen en yüksek verimlilik sonuçları gösterilmektedir. Fotovoltaik teknolojiler arasında kristal Si

tabanlı güneş hücreleri, pazarın en büyük bölümünü elinde tutan ve uzun yıllardır kullanılan en yaygın teknolojidir. Si tabanlı güneş hücrelerinin en yüksek verimlilikleri yaklaşık %26 civarında olup, bu hücreler genellikle kırılğan ve sert yapıdadır. Bir diğer önemli fotovoltaiik teknoloji ise ince film güneş hücreleridir. Kadmiyum tellür (CdTe), bakır indiyum galyum selenit (CIGS), amorf-Si gibi malzemeler kullanılarak üretilen ince film güneş hücreleri maliyet etkin üretim süreçleri ve esnek altlıklar üzerinde uygulanabilme potansiyelleri ile dikkat çekmektedir. Ancak her ne kadar üretim maliyetleri düşük olsa da bu hücrelerin verimlilikleri Si güneş hücrelerine kıyasla daha az olduğundan ve malzemesel problemlerinden dolayı pazardaki payları daha düşük kalmıştır. CdTe güneş hücrelerinin laboratuvar verimliliği yaklaşık %22,1 iken, CIGS hücrelerinin verimliliği %23,4 seviyelerindedir [1].



3

Üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı III-V yarıiletken malzemelere (GaAs, InP, GaN, AlGaAs, GaInP, AlGaInP, vb.) dayalı güneş hücreleri, fotovoltaik teknolojiler arasında ayrı bir öneme sahiptir. III-V grubu yarı iletkenler, yüksek elektron mobilitesi, doğrudan ve ayarlanabilen bant aralığı ve mükemmel optoelektronik özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı günümüz hızlı elektronik ve optoelektronik uygulamalarda neredeyse rakipsiz bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu üstün özellikleri ayrıca Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere çok yüksek verimli güneş hücrelerinin üretilmesine de olanak sağlamaktadır. Epitaksiyel olarak büyütülen bu malzemeler örgü ve bant mühendisliği sayesinde tek eklem güneş hücrelerinin ötesinde güneş ışıma tayfının etkin bir şekilde soğurulmasını sağlayan çok eklemli yüksek verimli çoklu eklem (multi junction) güneş hücrelerinin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Günümüzde 6 eklemli rekor seviyede verimlilik değerine (tek güneş ışıması altında %40 civarı) sahip III-V grubu güneş hücrelerinin üretilbileceği gösterilmiştir. Ancak üretim maliyetlerinin çok yüksek olması bu hücrelerin kullanımını maliyetin ikinci plana itilebildiği uydu-uzay, havacılık ve bazı askeri/sivil özel uygulamalarla sınırlandırmıştır. Genel yeryüzü kullanımında diğer hücre teknolojileriyle hala rekabet edememektedir. Şu an sadece yoğunlaştırılmış fotovoltaik teknolojilerinde kullanım alanı bulabilmektedir. Son yıllarda Si fotovoltaik teknolojilerinde oluşan maliyet azaltmalarından dolayı yoğunlaştırılmış fotovoltaik uygulamaları da neredeyse tükenme noktasına gelmiş, III-V grubu hücrelerin kullanım alanları sadece ağırlık/Watt, yüksek sıcaklık ve radyasyon tolerans değerlerinin önemli olduğu uydu-uzay ve havacılık kullanımlarına indirgenmiştir [2-3]. Epitaksiyel büyütme için gerekli kaliteli alttaş maliyeti, büyütmede kullanılan malzeme ve sistemlerin pahalı olması, fabrikasyon süreçlerinin pahalı ve karmaşıklığı III-V grubu güneş hücrelerinin üretim maliyetini rekabet edemeyecek şekilde arttırmaktadır. Bu üretim maliyetleri arasında, yüksek kaliteli alttaş girdisi açık ara en büyük paya sahiptir. Hücre yapısına ve teknolojisine bağlı olarak alttaş maliyeti toplam hücre üretim maliyetinin %80-85'ini oluşturmaktadır.

III-V malzeme grubunun en bilineni ve yaygın olarak kullanılanı, üretim ve alttaş teknolojisi en gelişmiş olan GaAs'tir. III-V grubu yüksek verimli tek ve çok eklem hücre teknolojilerinin en temel bileşeni olan GaAs, güneş ışıma tayfında yüksek foton soğurma katsayısı ve düşük yeniden birleşme hızları sayesinde teorik limite yakın verimlilikte tek eklem hücrelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Son yıllarda GaAs tabanlı III-V grubu güneş hücrelerinin üretim maliyetlerini azaltabilmek için farklı yaklaşımlarla

yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu yaklaşımlardan en öne çıkanı ve önemli olanı pahalı GaAs alttaşların tekrar tekrar yeniden kullanımına olanak sağlayan epitaksiyel film kaldırma (Epitaksiyel Lift-Off (ELO)) tekniğidir. Bu yöntemle epitaksiyel olarak büyütülen aktif aygıt yapısı (tek/çok eklem güneş hücreleri, elektronik ve optoelektronik aygıtlar) üzerine büyütüldüğü pahalı alttaştan kaldırılarak başka bir esnek taşıyıcıya (metal, plastik vb) transfer edilmektedir. Geride kalan alttaş ise mekanik ve kimyasal parlatma sürecinden sonra yeni bir aygıt büyütmesi için defalarca kullanılabilir. Böylece hücre üretimindeki pahalı alttaş girdisi önemli ölçüde azaltılmaktadır.

ELO yöntemiyle üretilen GaAs tabanlı ince film hücreler maliyet etkinliğinin ötesinde, esnekliği, hafifliği, konvansiyonel alttaş tabanlı muadillerine göre daha yüksek verimliliği ve uygulamada sunduğu fonksiyonellikleriyle III-V grubu hücre teknolojisinde yeni bir kulvar açmıştır. ELO yöntemiyle üretilen bu esnek ince film hücreler arka kontaklarını ayna olarak kullanabildiklerinden aktif hücre kalınlığı alttaş tabanlılara göre çok daha ince olmakta, artan optik yoğunlukla daha verimli, hava kütlesi (air mass) toleransı ısı ve radyasyon toleransı çok daha yüksek olmaktadır. Ayna vazifesi gören arka kontak aynı zamanda foton geri dönüşüm etkisini konvansiyonel hücrelere göre önemli ölçüde arttırmaktadır. Böylece elektron deşik birleşmesinden oluşan fotonlar aktif hücre yapısı içerisinde soğurularak yeniden elektron deşik çiftleri oluşturabilmektedir [4]. Bu nedenle, esnek ince film GaAs tabanlı güneş hücrelerinin geliştirilmesi ve maliyet etkin bir şekilde yaygınlaşması hızla gelişen ve yüksek miktarda güneş hücresi talebi oluşturan uydu-uzay ve havacılık teknolojilerinin maliyet etkin ve güvenli bir şekilde sürdürülebilmesi için önem arz etmektedir.

ELO yöntemiyle GaAs tabanlı III-V grubu güneş hücrelerinin maliyeti düşürülebilse de maliyetin daha da aşağı düşürülmesi gerekmektedir. Endüstriyel bir üretimde özellikle epitaksiyel büyütme girdilerinin de mümkün olduğunca en alt seviyelere indirilebilmesi önem arz etmektedir. III-V grubu güneş hücreleri epitaksiyel olarak MOCVD (Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme) veya MBE (Moleküler Demet Epitaksi) yöntemleriyle büyütülmektedir. MBE sistemi genel olarak araştırma geliştirme faaliyetlerinde kullanılırken MOCVD büyük ölçek endüstriyel üretimde hem maliyet hem de büyütme hızı açısından tercih edilen yöntemdir. Epitaksiyel büyütme maliyetini daha da alt seviyelere indirebilmek için gelecek yıllarda kaynak malzemesi olarak metal organikleri kullanan MOCVD yönteminin yerini alabilecek kaynak

malzemesi (metal hidritler) daha ucuz ve büyütme hızı çok daha yüksek olan DHVPE (Dinamik Hidrit Buhar Faz Epitaksi) yöntemi geliştirilmeye çalışılmaktadır. Epitaksiyel büyütme maliyetini düşürebilecek bir diğer yöntem ise aktif hücre yapısının yayıcı ve optik pencere epitaksiyel katmanlarının epitaksiyel olmayan ucuz malzeme gruplarıyla değiştirilmesidir. Böylece hücrenin soğurma katmanı epitaksiyel olarak büyütülürken yayıcı ve optik pencere katmanı epitaksi gerektirmeyen ucuz sistem ve malzemelerle kaplanabilmekte, ayrıca fabrikasyon süreçleri de daha ucuz ve kolay hale gelebilmektedir. Bu yöntemde temel yaklaşım yayıcı katman ve optik pencerelerin büyük bant aralıklı ince bir taşıyıcı seçici metal oksit katmanla değiştirilmesidir. Enerji bant hizalanması asimetrik olacak şekilde seçilen taşıyıcı seçici kontaklar bir taşıyıcının (elektron veya deşik) kolayca geçmesine izin verirken diğerinin geçişini etkin bir şekilde engellemektedir. III-V grubu malzemeler için en iyi taşıyıcı seçici kontaklar yüksek bant aralıklı geçiş metali oksitleri ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{NiO}$ , vb) olarak gözükmemektedir. Bu metal oksitler hali hazırda organik ve perovskit gibi hücre teknolojilerinin en temel yapılarından biridir. Son yıllarda Si teknolojisine uyarlama çalışmaları başarılı bir şekilde devam etmektedir. Si kadar yoğun araştırma çalışmaları yapılmasa da alttaş tabanlı III-V grubu hücrelerde bu taşıyıcı seçici kontak kullanımı çalışmaları başlamıştır. Yüksek bant aralıklı taşıyıcı seçici metal oksit kullanımı III-V grubu hücrelerin etkin bir şekilde kullanmadığı güneş tayfının yüksek enerjili bölgesinin etkin bir şekilde kullanılmasına izin vermesi ve hücrelerden daha yüksek açık devre sağlayabilmesi sayesinde geleneksel p-n eklem hücrelere göre daha verimli ve daha maliyet etkin hücrelerin üretilmesine olanak sağlayabilme potansiyeli çok yüksektir.

Bu tez çalışması kapsamında, ilk defa GaAs esnek güneş hücrelerine elektron seçici kontak (ESC) katmanı entegrasyonu ile GaAs tabanlı ELO esnek ince film güneş hücresi fabrikasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve gösterilmiştir. Soğurma bölgesi p-GaAs olan yarı hücre yapılarına elektron seçici kontak olarak  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  ve ikili katman  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  metal oksitler kullanılmış, ITO ise bu hücrelerde ışık geçirgen kontak olarak kullanılmıştır. Hücre yapıları öncelikle teorik olarak modellenip performans değerleri hesaplanmış, teorik olarak en iyileştirilmiş yapılar üzerinden aygıt üretim ve fabrikasyon süreçleri gerçekleştirilmiştir. Hem aygıt simülasyon çalışmaları ve hem de üretilen hücrelerden elde edilen öncül sonuçlar GaAs/ESC hibrit hücrelerin III-V grubu hücre teknolojilerindeki potansiyelini göstermiştir. Her ne kadar deneysel sonuçlar teorik beklentilerden uzak kalsa da elde edilen bulgular özellikle metal oksit kaplama,

GaAs/ESC arayüz yönetimi ve hücre fabrikasyon süreçlerinde yapılacak iyileştirmelerle bu hücre yapılarının yüksek performans değerlerine ulaşabileceğini göstermiştir. Öncül olan bu araştırma sonuçlarının bu konuda çalışacak araştırmacılar açısından dikkat çekeceği öngörülmektedir.

### 1.1. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması kapsamında:

Bölüm 2’de III-V grubu güneş hücreleri, GaAs güneş hücrelerinin fiziksel ve optik özellikleri ile uygulama alanları anlatılmıştır. Esnek ince film güneş hücreleri için ELO süreçleri açıklanmıştır.

Bölüm 3’te, GaAs tabanlı III-V grubu güneş hücreleri için elektron taşıyıcı seçici katman alanındaki literatür çalışmaları ve ESC katmanlar özellikleri anlatılmıştır.

Bölüm 4’te GaAs/ESC hibrit hücrelerin tasarım ve teorik hesaplamaları yapılmış, hücre yapıları teorik olarak en iyileştirilmiş ve elde edilen bulgular detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Bölüm 5’te Hücre üretiminde kullanılan deneysel teknikler, aygıt fabrikasyon ve aygıt karakterizasyon süreçleri detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Bölüm 6’da fabrikasyonu tamamlanan GaAs/ESC güneş hücrelerinin elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları sunulmuş elde edilen sonuç ve bulgular tartışılmıştır.

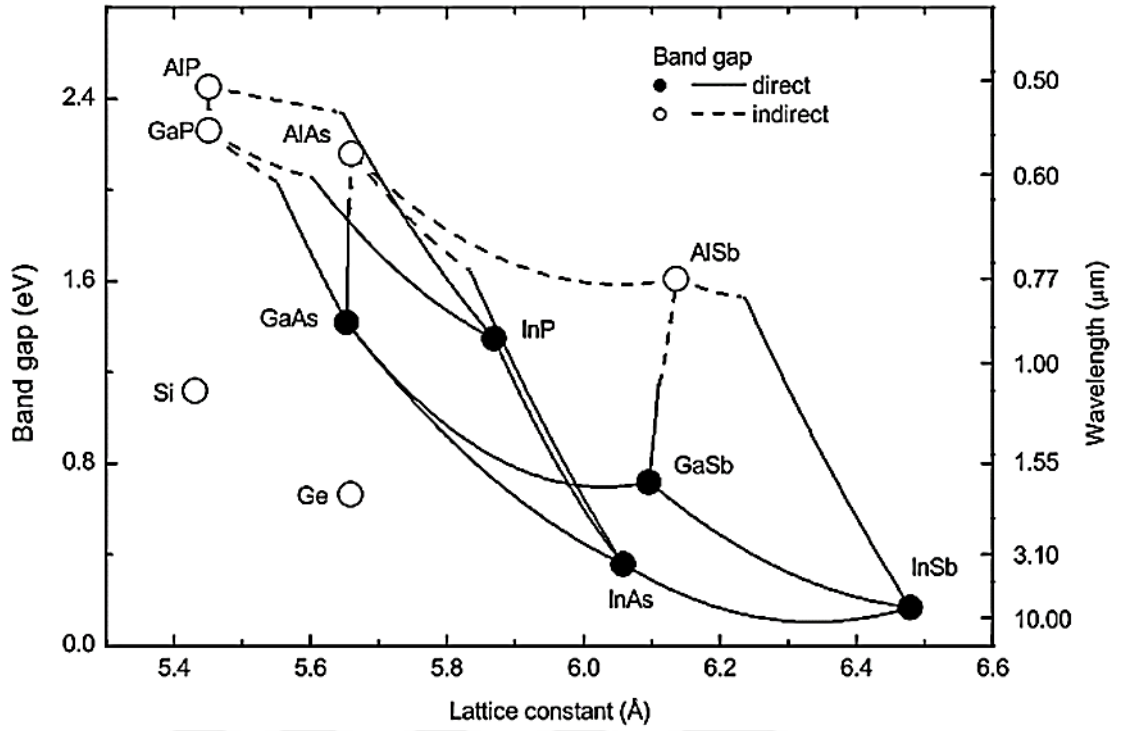
Bölüm 7’ de tez çalışması sürecinde elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar kısaca ele alınmış bu hücre yapıları için gelecek perspektifi çizilmeye çalışılmıştır.

## **2. III-V GRUBU GaAs GÜNEŞ HÜCRELERİ**

### **2.1. III-V Grubu Yarı İletkenler**

III-V grubu yarı iletkenler, periyodik tablonun III. grubunda yer alan elementler (galyum (Ga), indiyum (In), alüminyum (Al)) ile V. grubunda yer alan elementler (arsenik (As), fosfor (P), antimon (Sb)) arasında oluşan kimyasal bileşiklerdir. Bu malzemeler, elektronik ve optoelektronik cihazlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir, özellikle yüksek hızlı elektronik ve fotonik cihazların temelini oluşturmaktadır. III-V yarı iletkenlerden, iki, üç veya dört kimyasal elementten oluşan ikili (GaAs, indiyum fosfit (InP)), üçlü (alüminyum galyum antimonit (AlGaSb), galyum indiyum fosfit (InGaP)) veya dördü (alüminyum galyum indiyum fosfit (AlGaInP)) alaşımlar oluşturabilmektedir.

III-V grubu ve diğer yarı iletkenlerin elektriksel ve fiziksel özelliğini belirleyen bant aralığı enerjisi (bandgap) ve örgü sabitidir (lattice constant). Bant aralığı bir yarı iletkenin elektronik özelliklerini belirlerken, örgü sabiti kristal yapının boyutlarını tanımlar. III-V grubu yarı iletkenler doğrudan bant aralığına sahiptir ve bu iki özellik arasındaki ilişki, bu aygıtların performansını büyük ölçüde etkiler. Farklı bileşiklerin ve alaşımların optik ve elektronik özelliklerini optimize etmek için bant aralığı ve örgü sabiti kullanılır. Şekil 2.1'de gösterilen grafikte, bu özelliklerin birleşimi ile çeşitli III-V grubu alaşımlar üretilmektedir. Üçlü veya dördü alaşımlarda element çiftlerinin konsantrasyonu, bant aralığı, kırılma indisi ve soğurma katsayısı gibi optik özellikleri ayarlamak için değiştirilebilir. Örgü uyumu sağlandığında, III-V grubu malzemelerden oluşan üçlü ve dördü bileşikler, çoklu eklem hücreleri gibi gelişmiş aygıt yapıları için çeşitli olanaklar sunmaktadır. Bu özellik sayesinde, örgü sabiti ve bant mühendisliği yapılarak beşli veya daha fazla bileşik tasarlamak mümkün olmaktadır.



Şekil 2.1. III-V yarı iletkenlerin bant aralığı enerjisi ve örgü sabiti [5].

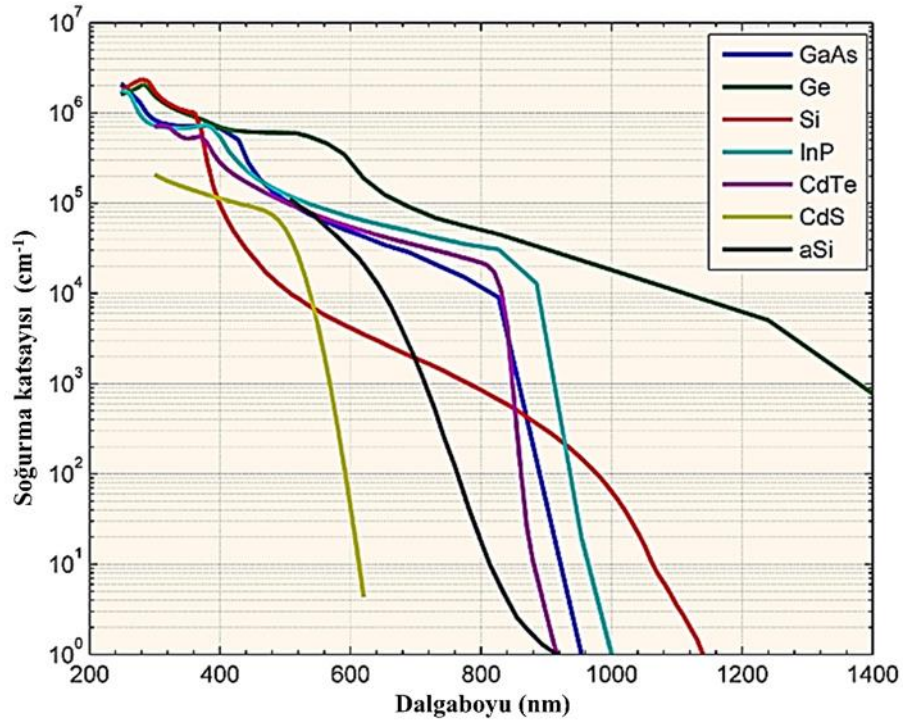
III-V grubu yarıiletkenler, sahip oldukları optik ve elektriksel özellikleri ile ileri teknoloji ve yenilikçi çözümler geliştirmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, yoğunlaştırılmış (ya da konsantre) fotovoltaik sistemlerden, kızılötesi ışık yayan ve lazer diyotlardan heteroeklem güneş hücrelerine, fotodedektörlerden telekomünikasyon lazerlerine, görüntüleme ve sensörlerden yüksek elektron mobiliteli transistörlere (HEMT) kadar elektronikler, telekomünikasyon ve nanoelektronik gibi geniş bir yelpazede askeri, uydu-uzay teknolojileri gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır.

## 2.2. III-V Grubu Güneş Hücreleri

Yüksek verimlilik potansiyelinin yanı sıra, III-V yarı iletken malzemeler, elementel bileşimlerle bant aralığı ayarlanabilirliği (Şekil 2.1), doğrudan bant aralığı enerjileri tarafından daha yüksek foton emilimi, uzaydaki yüksek enerjili ışınlarla karşı daha yüksek direnç ve Si güneş hücrelerine göre ısı ile daha az verimlilik düşüşü gibi avantajlara sahiptir. III-V güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimleri her geçen yıl istikrarlı bir şekilde artmaktadır.

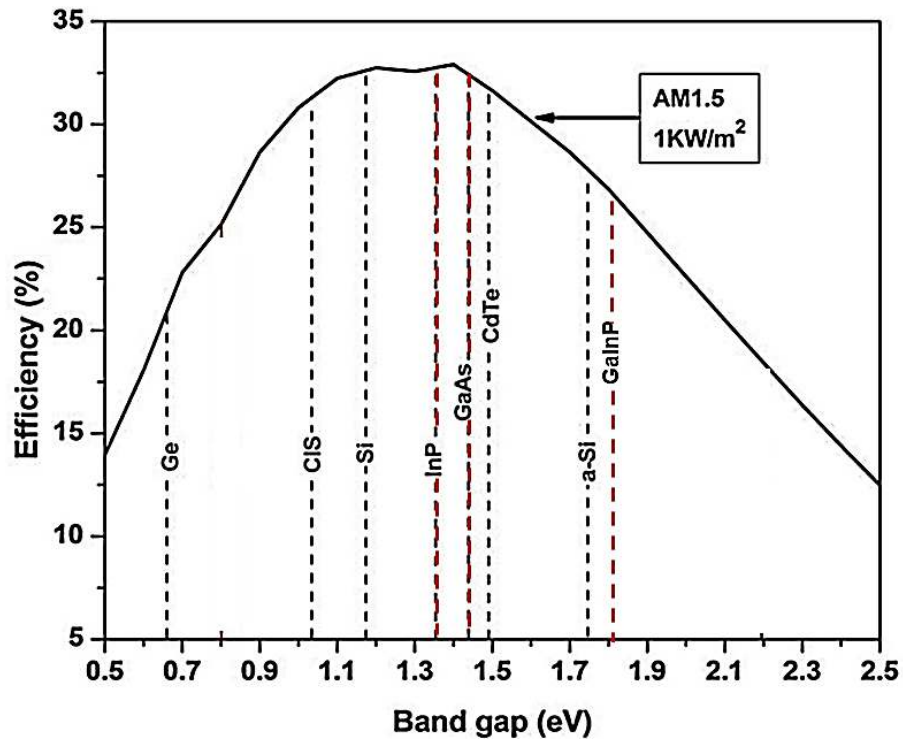
### 2.2.1. Tek eklemli III-V grubu güneş hücreleri

Tek eklem III-V güneş hücreleri, genellikle GaAs, InP, GaSb (galyum antimonit) ve GaInP gibi malzemelerden yapılmaktadır. Bu malzemeler, doğrudan bant aralığına sahip olup, fotonların etkili bir şekilde soğurulmasını sağlamaktadır. GaAs, yaklaşık 1,42 eV'lik bir bant aralığına sahiptir ve güneş spektrumunun büyük bir kısmını verimli bir şekilde soğurabilmektedir. Şekil 2.2'de güneş hücrelerinde kullanılan yarı iletken malzemelerin, soğurma katsayılarının dalga boyuna bağlı grafiği verilmektedir. GaAs yüksek soğurma katsayısına sahip olduğundan güneş ışınlarını Si'ye kıyasla daha iyi soğurmaktadır.



Şekil 2.2. Güneş hücrelerinde kullanılan bazı yarıiletkenlerin dalga boyuna göre soğurma katsayısı [6].

Güneş hücresinin çalışması için ilk fiziksel mekanizma güneş spektrumundan fotonların emilmesidir. Bunun için, p-n-eklemini oluşturan malzemelerin güneş spektrumu ile uyumlu bir bant aralığı enerjisine sahip olması gerekir. Malzeme bant aralığının bir fonksiyonu olarak tek eklemli bir güneş hücresi için Shockley ve Queisser verimlilik sınırı (S-Q) çeşitli yarıiletken malzemeler için hesaplanmıştır [7]. Tek eklemli yarı iletkenler için bu verimlilik sınırları, Şekil 2.3'te yoğunlaştırılmamış AM1.5G güneş aydınlatması için gösterilmiştir. Tek eklemli bir güneş hücresi için maksimum dönüşüm verimi, 1,34 eV'lık bir optimum bant aralığı ile %33,7 olarak hesaplanmıştır. AM1.5G spektrumu için 1,0 ile 1,5 eV arasındaki malzeme bant aralığı verimliliği en üst düzeye çıkarmaktadır. GaAs ve InP gibi önemli III-V grubu malzemeler, Şekil 2.3'teki gibi bant aralıkları sayesinde dönüşüm verimliliğinde en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenle, güneş hücreleri üretiminde III-V yarı iletkenlere büyük ilgi gösterilmektedir.

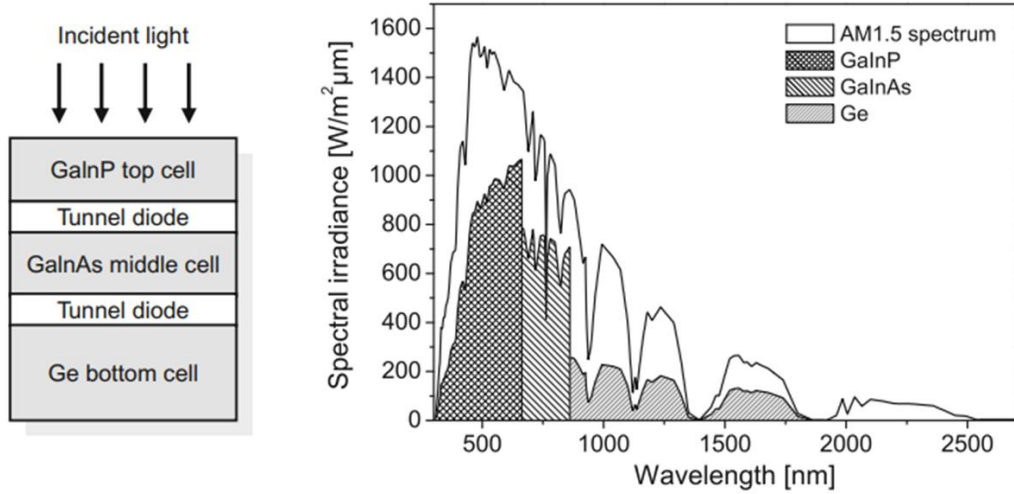


Şekil 2.3. Bant aralığının bir fonksiyonu olarak tek eklemli güneş hücresi için teorik Shockley-Queisser (SQ) verimlilik limiti (düz çizgi) [7-8].

Diğer taraftan güneş spektrumundan daha fazla yararlanarak SQ sınırının üzerinde verimlilik elde etmek için, farklı bant aralıklarında birden fazla yarı iletkenin kullanıldığı çok eklemli hücreler üretilmektedir. Bu sayede farklı bant aralığındaki malzemelerin güneş ışığını soğurma özelliğinden yararlanılmaktadır.

### 2.2.2. Çok eklemli III-V grubu güneş hücreleri

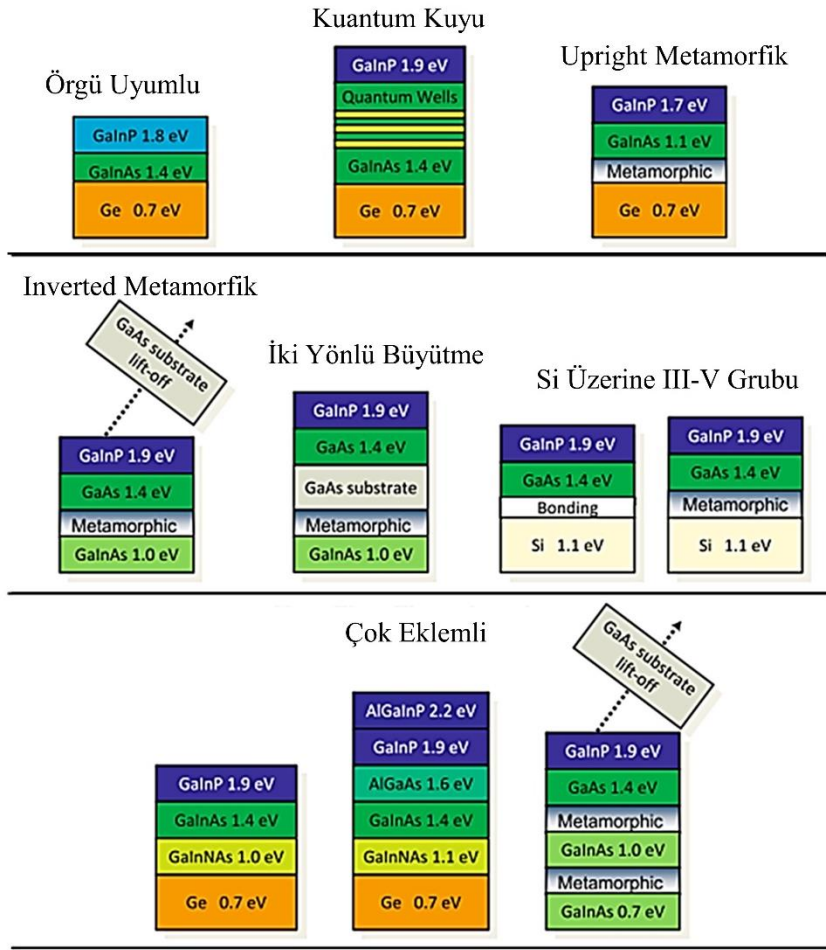
Bir güneş hücresindeki enerji kayıplarının en önemli sebeplerinden biri, gelen fotonun enerjisi ile hücre malzemesinin bu enerjiyi elektriğe dönüştürebilme kapasitesi arasındaki uyumsuzluktur. Eğer foton enerjisi bant aralığı enerjisinden küçükse hücrede hiçbir soğurma gerçekleşmez. Foton enerjisinin sadece bant aralığı enerjisine eşit olan kısmı elektrik enerjisi olarak üretilebilir, diğer kısmı bant aralığından daha büyükse ısı olarak boşa harcanmaktadır. Bu nedenle, farklı bant aralığı enerjilerine sahip fotovoltaiik malzemelerin çoklu istiflenmesi, bu enerji kaybını azaltarak, güneş ışığı spektrumunun verimli bir şekilde soğurulmasını mümkün kılmaktadır. Farklı III-V yarı iletkenlerden yapılmış güneş hücreleri bu şekilde istiflendiğinde yüksek verimler elde edilebilmektedir. Bu, güneş spektrumunun verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Şekil 2.4 (soldaki) tipik bir üçlü bağlantı güneş hücresinin şemasını göstermektedir. GaInP, GaInAs ve Ge'den (germenyum) oluşan üç alt hücre üst üste istiflenir ve tünel diyotlarla seri olarak birbirine bağlanır. Güneş spektrumunun verimli bir şekilde kullanılmasının anahtarı, her bir alt hücrenin bir altındakinden daha yüksek bir bant aralığına sahip olmasıdır. Bu sayede her bir alt hücre kendi bant aralığına en yakın spektral aralıktaki ışığı soğurarak enerji kayıplarını azaltmaktadır (Şekil 2.4 (sağdaki)).



Şekil 2.4. (sol) GaInP/GaInAs/Ge üçlü eklemli güneş hücresi yapısı (sağ) Dalga boyuna bağlı AM1.5 güneş spektrumunun üç eklemli güneş hücresi tarafından kullanılabilen kısımları grafiği [9].

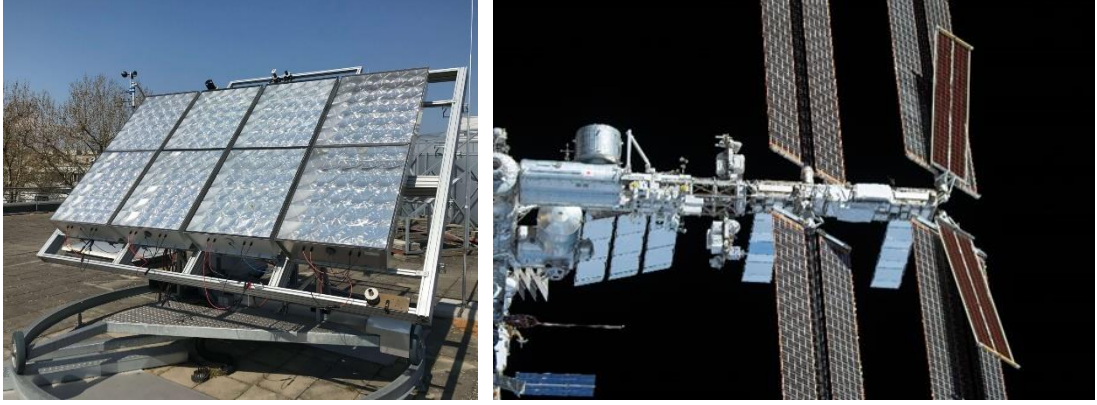
Çok eklemli güneş hücresi yaklaşımı, ilk olarak 1970'lerin sonundan 1980'lerin ortasına kadar Research Triangle Institute ve Varian Research Center tarafından, AlGaAs/GaAs çift eklemli yapılar şeklinde geliştirilmiştir. 1987 yılına gelindiğinde InGaP/GaAs tandem güneş hücrelerini oluşturmak için AlGaAs yerine InGaP kullanılabileceği Olson vd. tarafından gösterilmiştir [10]. 1990'ların sonunda ise InGaP/GaAs/Ge üçlü eklemli güneş hücresi tasarlanmıştır.

Üçlü eklemli güneş hücresinin piyasaya sürülmesinden günümüze, bu teknoloji dönüşüm veriminde gelecekteki hücreler için öncülük etmiştir. GaInP/GaAs/Ge (1,82/1,42/0,67 eV) kafes uyumlu üçlü bağlantı hücreleri, %30'un üzerinde verimlilikle, son yirmi yılda birçok uzay uygulamasında yer almıştır. Bu hücrelerde alttaş olarak örgü uyumlu Ge alttaşı kullanılmaktadır. Diğer taraftan Ge alttaşın kullanılmadığı 6-eklem hücre yapısına kadar istiflenmiş ters metamorfik (IMM) hücre yaklaşımı geliştirilmiştir. Hücre alttaş yapıştırma ve mekanik birleştirme olmadan doğrudan büyütülmüştür [11]. Bu yapının yoğunlaştırılmış güneş altında ölçümünde %47,1 rekor verim elde edilmiştir [12]. Pahalı Ge alttaşını çok eklemli yapıdan çıkarmak için III-V grubu hücrelerin Si hücrelerle alttaş yapıştırma veya mekanik birleştirme yoluyla entegrasyonu araştırılmaya başlanmıştır. Dört terminal mekanik olarak birleştirilen GaInP/GaAs/Si çoklu eklem hücreden %35,9 [13], alttaş yapıştırma tekniği ile iki terminalli, üç eklem hücreden ise %34,5 verimliliğe ulaşılmıştır [14]. III-V grubu hücrelerin verimini daha da arttırmak için alternatif yaklaşımlar araştırılmaktadır [15-18], bu yaklaşımlar Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Farklı III-V güneş hücresi konseptlerinin şematik gösterimi [9].

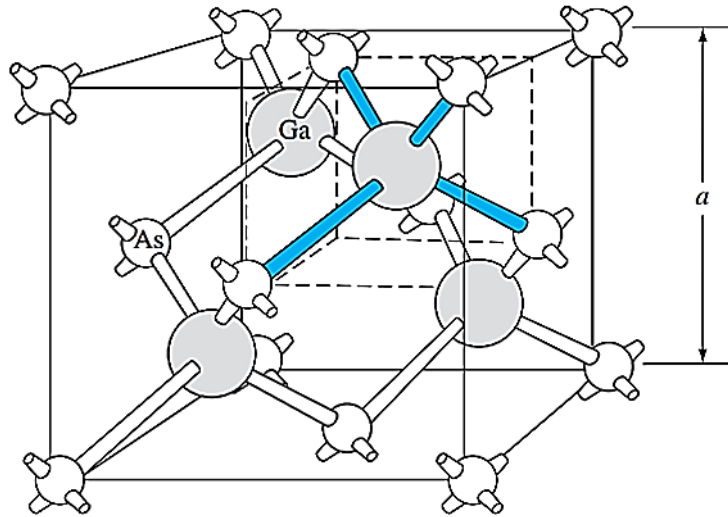
Çok eklemlili güneş hücreleri, güç/ağırlık oranının yüksek olmasının istendiği iletişim uydularının uzay uygulamalarında tercih edilen teknoloji olmuştur. Diğer taraftan yeryüzü uygulamalarında, çok bağlantılı güneş hücreleri, kavisli aynalar şeklinde yansıtıcı optikler ya da geleneksel mercekler veya Fresnel mercekleri şeklinde kırıcı optikler kullanarak güneş ışığını güneş hücreleri üzerine yoğunlaştıran yoğunlaştırıcı (ya da konsantratör) güneş teknolojilerinde de kullanılmaktadır [19]. III-V grubu hücrelerin konsantratör ve uzay uygulamalarında kullanımı Görsel 2.1’de gösterilmektedir.



**Görsel 2.1.** (sol) yoğunlaştırıcı modül (AZUR SPACE, Fraunhofer ISE) [20], (sağ) SpaceX uzay aracındaki ISS Roll Out Solar Array (ROSA) güneş dizileri [21].

### 2.3. GaAs

GaAs, periyodik tablonun III grubundan Ga ve V grubundan As elementlerinin birleşimiyle oluşan ikili bir bileşik yarı iletkenidir. GaAs Şekil 2.6’da gösterilen çinkoblent kristal yapısına sahiptir. Bu kristal yapıda, her Ga atomu en yakın dört As atomu ile tetrahedral olarak birbirine bağlanmaktadır. Tablo 2.2’de GaAs’in 300 K’de diğer elektriksel ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

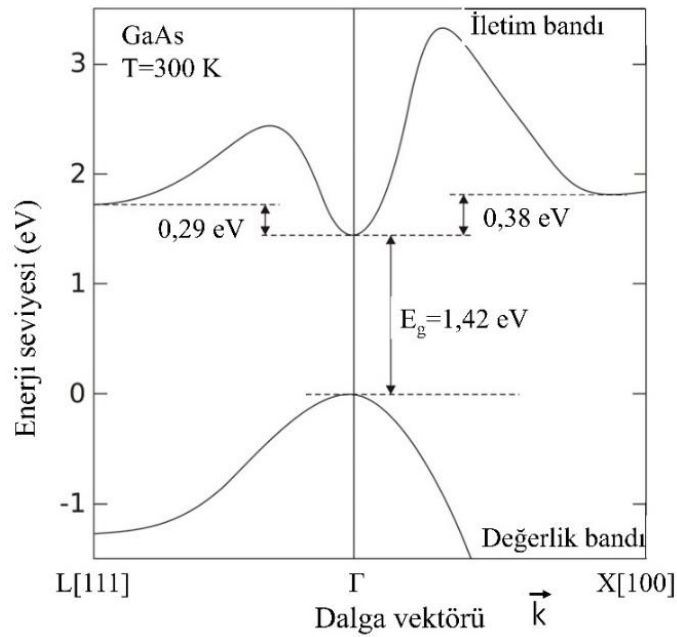


**Şekil 2.6.** GaAs’in kristal yapısı, “a” örgü sabitidir [22]

**Tablo 2.1.** GaAs'in, 300 K'de fiziksel ve elektriksel özellikleri [23].

|                                                      |                        |
|------------------------------------------------------|------------------------|
| Örgü sabiti (Å)                                      | 5,653                  |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                        | 5,317                  |
| Bant aralığı (E <sub>g</sub> , eV)                   | 1,42                   |
| Bant-aralığı türü                                    | Doğrudan               |
| Atom sayısı/cm <sup>3</sup>                          | 4,42x10 <sup>22</sup>  |
| Elektron mobilitesi (cm <sup>2</sup> /V-s)           | 9.200                  |
| Deşik mobilitesi (cm <sup>2</sup> /V-s)              | 320                    |
| Katkısız taşıyıcı konsantrasyonu (cm <sup>-3</sup> ) | 2,25 x 10 <sup>6</sup> |

GaAs'ın bant yapısı Şekil 2.7'de gösterilmektedir. GaAs'da iletim bandı enerjisinin minimumu ve değerlik bandı enerjisinin maksimumu aynı momentum değerinde meydana gelir. Bu özelliğe sayesinde GaAs doğrudan bant aralığına sahiptir ve izin verilen iki bant arasındaki geçişler kristal momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan gerçekleşebilmektedir [22]. Bu doğrudan bant aralığı malzemenin optik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır.



**Şekil 2.7.** GaAs'in enerji-bant yapısı, E<sub>g</sub> enerji bant aralığı, k: dalga vektörü) [22].

GaAs, yüksek elektron hareketliliği, doğrudan bant aralığı ve yüksek termal kararlılık gibi özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 2.2'de GaAs'ın dalga boyuna karşı soğurma katsayısı grafiği gösterilmektedir, foton enerjisi bant aralığına yakın olduğunda GaAs için ışık soğurma oranı kristal Si'den çok daha yüksektir. Güneş ışığının birkaç mikrometrede etkili bir şekilde soğurabilmesi sayesinde, GaAs ince film güneş hücreleri için uygun bir malzemedir.

GaAs'ın optik ve elektriksel özellikleri, yüksek sıcaklık ve radyasyon dayanımı sayesinde uydu uzay teknolojilerinde kullanılmaktadır. Yeryüzü uygulamalarında ise yarı iletken lazerlerde ve diğer optik cihazlarda, yoğunlaştırıcı güneş teknolojilerinde kullanılmaktadır.

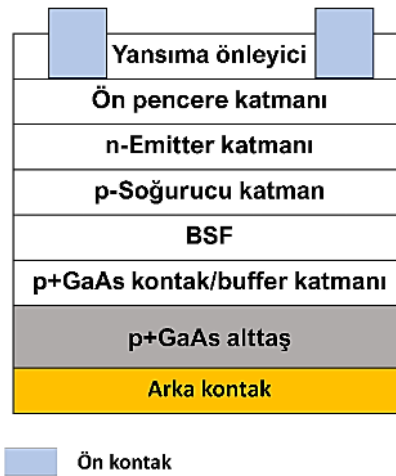
#### **2.4. GaAs Güneş Hücreleri**

1960'ların başında, GaAs tabanlı p-n eklem güneş hücrelerinin, Si'ye kıyasla daha yüksek sıcaklık kararlılığı ve radyasyon direnci sağladığı keşfedilmiştir. Sıcaklığa dayanıklı GaAs güneş hücrelerinin ilk büyük uygulamalarından biri, 1965'te Venüs'e gönderilen Rus uzay araçları Venera-2 ve Venera-3'te kullanılmıştır. 1970'te Lunokhod-1 ve 1972'de Lunokhod-2 uzay araçlarında da 4 m<sup>2</sup> GaAs güneş paneli bulunmaktaydı. GaAs güneş dizilerinin, Si'ye göre Ay ve Venüs'te daha iyi sıcaklık dayanımı sergileyerek daha etkili çalıştığı gösterilmiştir. Geliştirilen GaAs güneş hücreleri %11 verimlilik (AM0) sağlamıştır. İlk GaAs heteroyapı güneş hücreleri, 1970 yılında SSCB'de Zhores Alferov'un grubu tarafından üretilmiştir [24]. AlGaAs/GaAs heteroyapılı güneş hücresinin uzay uygulamalarında ölçülen ilk verimi %18-19 (AM0) olmuştur. Bu gelişmeler, AlGaAs/GaAs güneş hücrelerinin yüksek verimliliği ve gelişmiş radyasyon direnci nedeniyle 1970'ler ve 1980'lerde uzay araçları için büyük ölçekli üretimini teşvik etmiştir. 1986 yılında fırlatılan Rus uzay istasyonu MIR'e, toplam 70 m<sup>2</sup> alana sahip bir AlGaAs/GaAs güneş dizisi yerleştirilmiştir (Görsel 2.2). 1980'lerin başında, GaAs güneş hücreleri verimlilik açısından Si güneş hücrelerinden daha üstündü. 1990'dan 2007'ye kadar GaAs güneş hücrelerinin rekor verimliliği %25,1 olarak sabit kalmıştır. Son 10 yılda, tek eklemli GaAs güneş hücrelerinin gelişimi hızlı olmuştur. Çok kristalli tek eklem GaAs güneş hücrelerinin verimliliği %18,4'e ulaşmıştır [25]. Bugüne kadar, ince film güneş hücreleri arasında %29,1 rekor verim tek eklemli ince film GaAs güneş hücresinden elde edilmiştir [12].



**Görsel 2.2.** MIR Uzay İstasyonu'nun Ioffe Enstitüsü tarafından geliştirilen AlGaAs/GaAs güneş hücrelerine dayalı PV dizileri [26].

Geleneksel p-n eklem GaAs güneş hücresinin yapısı Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bu yapıda, pencere katmanı AlGaAs gibi geniş bant aralıklı bir malzemeden oluşur ve yüksek enerjili fotonları işleyip düşük enerjili fotonların geçmesine izin verir. Ayrıca, yüzey yeniden birleşmesini azaltır. Pencere katmanının üzerinde, onu koruyan ve temas katmanı olarak işlev gören yüksek katkılı bir yansıma önleyici katman bulunur. Yayıcı katman ile n-p veya p-n katkılı GaAs soğurucu katmanlarından oluşur. Güneş hücresinin arka yüzeyinde, geniş bant aralıklı bir malzeme olan BSF (arka yüzey alan katmanı) yer alır ve bu katman, arka yüzeye azınlık taşıyıcı akışına karşı bir bariyer oluşturur.

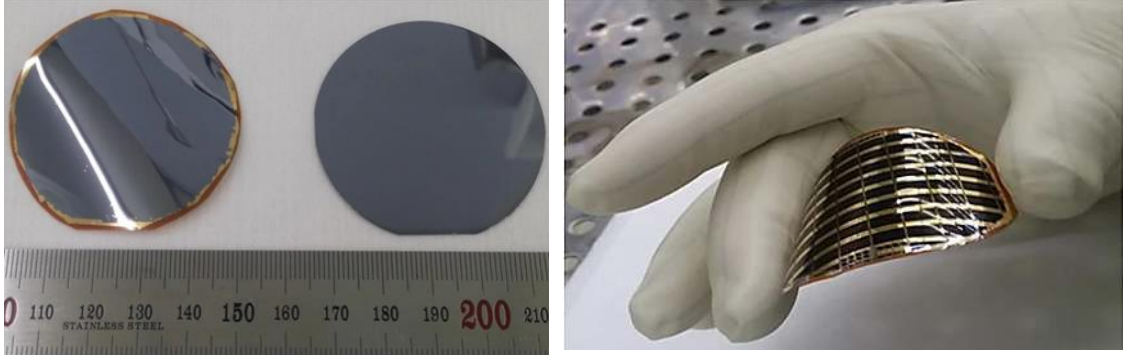


**Şekil 2.8.** Epitaksiyel film katmanlarının yer aldığı geleneksel p-n eklem GaAs güneş hücre yapısı

## 2.5. Esnek İnce Film GaAs Güneş Hücreleri

İnce film güneş hücresi, ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için esnek bir alt tabaka üzerinde istiflenen mikron kalınlığında ince bir soğurucu katmandan oluşan aygıt türüdür. İnce film güneş hücreleri ilk olarak 1970’lerde Delaware Üniversitesi Enerji Dönüşüm Enstitüsü tarafından tanıtılmıştır. Teknoloji geliştikçe, 21. yüzyılın başlarında ince film fotovoltaiik pazarı büyümeye başlamıştır. Nispeten düşük maliyetleri ve elektrik üretimindeki verimlilikleri nedeniyle çeşitli ince film güneş hücreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Amorf Si (a-Si), CdTe, CIGS, bileşik yarı iletkenler ve organik malzemeler gibi çeşitli ışık emici malzemeler ince film güneş hücrelerinde kullanılmak üzere araştırılmıştır. Bu malzemelerden GaAs tabanlı bir ince film güneş hücresi, en yüksek dönüşüm verimliliğine (%28,8, Alta Devices) sahiptir [12].

III-V güneş hücrelerinin üretimi sırasında oluşan maliyetler ve alttaş malzemelerinin maliyetleri, bu güneş hücrelerinin yeryüzü uygulamalar için yaygın olarak kullanımlarını sınırlamıştır. Bu nedenle, III-V güneş hücrelerinin üretim maliyetini önemli ölçüde azaltmak için yeni büyütme teknikleri üzerinde çalışılmaktadır [27]. Büyütme maliyetlerinin yanında alttaş maliyetlerini azaltmak için, ELO yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, ince film III-V güneş hücresi katmanları pahalı GaAs veya Ge alttaştan ayrılır ve camlar, esnek plastikler veya metaller gibi çeşitli düşük maliyetli alt tabakalara aktarılır [28-29]. Görsel 2.3(sol)’da, esnek bir alt tabaka üzerine aktarılan ince filmi ve büyümeye hazır geri dönüştürülmüş alttaşı göstermektedir. Görsel 2.3’te sağdaki resimde esnek taşıyıcı üzerine aktarılmış bir ELO hücre yapısı örneği gösterilmektedir. Güneş hücresinin üretim maliyetinin azaltılması ve alttaşın tekrar tekrar kullanılması, ELO ince film hücrelerinin geliştirilmesinin arkasındaki en önemli motivasyondur.



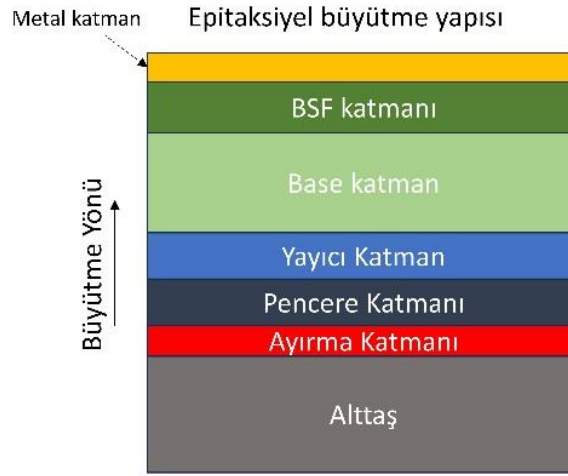
**Görsel 2.3.** *ELO filmin aktarıldığı esnek alt tabaka ve ELO işleminden sonra yeniden kullanılabilen büyütmeye hazır alttaş (sol), ELO yöntemi ile esnek alt tabaka üzerine üretilen ince film güneş hücresi (sağ) [30].*

Konagai ve arkadaşları [31], GaAs ince film güneş hücrelerinin üretimi için Soyulmuş Film Teknolojisini (PFT) içeren ELO yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde, ince film, aktif bölge ile alttaş arasında seçici olarak bir ayırma tabakası aşındırılarak alttaştan ayrılır. Ayrılan ince film başka bir taşıyıcıya aktarılabilir ve alttaş yeniden kullanılabilir hale gelir. GaAs alttaşın yeniden kullanılması üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltır [32-33]. Bu avantajlar nedeniyle, GaAs ince film güneş hücrelerinin üretiminde ELO yöntemi yaygın olarak araştırılmıştır. Wu ve çalışma arkadaşları, GaAs güneş hücresinin epikatman yapısını, aseton ve isopropanol gibi hidrofilik maddelerle karıştırılmış hidroflorik asit (HF) çözeltilerinde ELO işlemi uygulayarak GaAs alt tabakadan ayırmış ve ardından epikatman yapısını bir Cu alt tabakaya aktarmışlardır [34]. Bununla birlikte, elektrolizle kaplanmış Cu alt tabakalı ince film güneş hücresi çok esnek değildir ve ağırlığı nedeniyle düşük güç/ağırlık oranına sahiptir [35], bu da ince film güneş hücresinin avantajlarını azaltır. Tatavarti ve çalışma arkadaşları, n-p tek eklemlili GaAs ince filmini, kalın bir metal taşıyıcı üzerine transfer ederek bu güneş hücresinden, %21,11'lik bir dönüşüm verimi elde etmişlerdir [36], ancak üretilen aygıt nispeten ağırdır. Lee ve arkadaşları, 50  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir Kapton tabakası üzerine kaplanan Ir/Au ile oluşturulan çekme gerilimi sayesinde, yapıştırıcı içermeyen bir soğuk kaynak tekniği kullanarak bir ELO yöntemi tanımlamışlardır [37]. Moon vd. 125- $\mu\text{m}$  kalınlığında esnek bir alt tabaka üzerinde Cr/Au çift tabakasından kaynaklanan bir gerilim kullanan basit ve hızlı bir ELO yöntemini araştırmışlardır. AuBe/Pt/Au metal kombinasyonu yeni bir p-tipi omik kontak olarak kullanılmış ve esnek alt tabaka üzerinde n -p tek eklemlili GaAs ince film güneş hücresi üretilmiştir. Üretilen tek eklemlili GaAs ince film güneş hücresinin

verimi, %22,08'e ulaşmıştır [38]. Cheng vd., GaAs alttaşların doğrudan yeniden kullanımı için yeni bir ELO süreci geliştirmişlerdir. Yüzey gerilimi destekli epitaksiyel kaldırma adı verilen, bütün alttaş üzerinden filmin tamamen ayrıldığı yüksek verimli bir teknik geliştirilmiştir. Fotorezist ile kaplanan bütün alttaş, çözelti yüzeyinden 1°-20°'lik bir açıyla eğik olarak yerleştirilmiş ve aşındırma yönü seviyesine kadar HCl eklenmiştir. Ayırma katmanı olarak InAlP katmanını HCl bazlı aşındırıcı ile alttaştan ayırarak kalıntısız ve ELO sonrası düz yüzeyler elde etmişlerdir. Böylelikle hem sert hem de esnek alt tabakalara tam alttaş GaAs ince film transferini sağlamışlardır. Filmi ayrılan alttaş yüzeyine yüksek kaliteli GaAs güneş hücre yapılarının yeniden büyütülmesi sonrasında, güneş hücresinin dönüşüm veriminde belirgin bir düşüş olmadığını göstermişlerdir [39]. Sharma vd. tarafından [40] GaAs ve florür tampon arasına ek bir Ge ara katmanı eklenmesiyle, suda çözünür bir ayırıcı tampon yapısı üzerinde epitaksiyel olarak kaldırılan tek eklemlili GaAs güneş hücresinin güç dönüşüm verimliliğinin artırıldığı gösterilmiştir. Geleneksel ELO (epitaksiyel kaldırma) yöntemleri, ayırma katmanını aşındırmak için uzun süre konsantre HF kullanılmasını gerektirir ve bu süreç, zamanla alttaşın yüzey pürüzlülüğünü bozar. Bu nedenle, alttaş yüzeyinin pahalı ve yoğun kimyasal mekanik parlatma işlemlerinden geçmesi gerekmektedir ve bu işlemin maliyetinin bozulmamış 6-inç GaAs alt tabakanın maliyetinin yaklaşık %25'ine denk geldiği belirtilmiştir. Bu sorunu çözmek amacıyla, kimyasal mekanik parlatma işlemi gereksinimini ortadan kaldıran su destekli ELO (H<sub>2</sub>O-ELO) yöntemi geliştirilmiştir. İlk olarak, toprak alkali bileşikler kullanılarak suda çözünebilen, üç katmanlı bir tampon yapısı oluşturulmuştur. Ancak, GaAs aktif katmanlarındaki yüksek kusur yoğunluğu nedeniyle aygıtlar düşük performans göstermiştir. GaAs büyümesi için daha uygun bir yüzey enerjisi sağlamak amacıyla bir Ge ara katmanı eklenmiş ve bu sayede GaAs kristal kalitesinde iyileşme sağlanmıştır. Ge/(Ca,Sr)F<sub>2</sub>/BaF<sub>2</sub>/(Ca,Sr)F<sub>2</sub> üzerine üretilen tek bağlantı GaAs aygıtları, V<sub>oc</sub>'de ve dolum faktöründe (FF) artış ile güneş hücresi performans parametrelerinde iyileşme göstermiş ve bu da güç dönüşüm verimliliğinde %10,3'den %12,7 değerine genel bir iyileşme ile sonuçlanmıştır. Bu sonuçlarla birlikte, literatürde ELO yöntemi ile ilgili sunulan çalışmalarda verimli güneş hücresi elde edildiği kanıtlanmıştır.

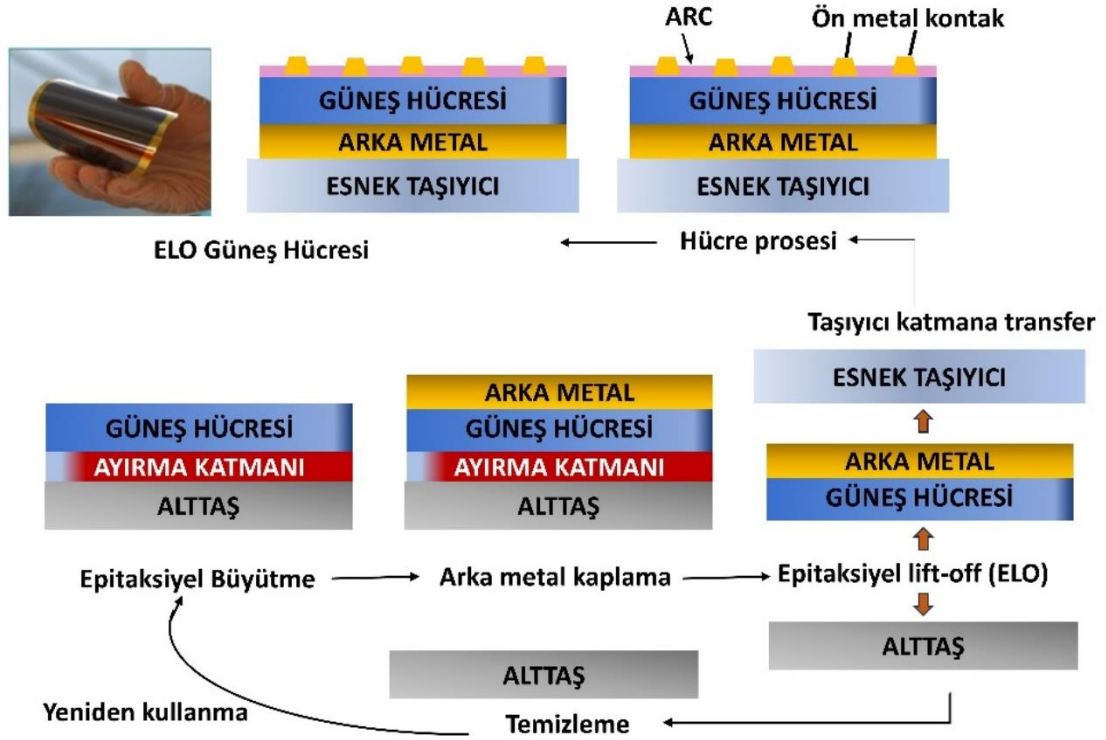
## 2.6. Epitaksiyel Film Kaldırma

ELO yöntemi ile geniş alanlarda ince, esnek ve yüksek verimli GaAs güneş hücreleri üretilebilir. ELO, Şekil 2.9'daki gibi, ters olarak epitaksiyel büyütülen ve AlAs serbest bırakma katmanını HF içerisinde alttaştan seçici aşındırma ile ayırarak, filmin alttaştan ayrılması prosesine dayanır. Genellikle AlAs olan serbest bırakma katmanı doğrudan GaAs tampon katmanı üzerine biriktirilir ve tek eklem ya da çoklu eklem güneş hücreleri daha sonra serbest bırakma katmanının üzerine biriktirilir. Serbest bırakma katmanının varlığı, güneş hücresi epitaksiyel yapısının alt tabakadan zarar görmeden çıkarılmasına izin verir. Kaldırma işleminden sonra güneş hücresine mekanik destek sağlamak için önce güneş hücresi yapısına bir metal destek katmanı uygulanır. Yansıtıcı görevi gören bu metal katman genellikle foton geri dönüşümünü iyileştirmek için kullanılabilen BSF katmanı üzerine biriktirilir. Alt tabakanın ayrılmasından sonra esnek tabana aktarılan filme, geleneksel güneş hücresi fabrikasyonu gerçekleştirilir.



Şekil 2.9. ELO yöntemi için epitaksiyel büyütme yapısı

ELO prosesi Şekil 2.10’da gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir. ELO proses teknolojisi, GaAs alttaşın daha sonraki güneş hücresi büyütmeleri için yeniden kullanılabilmesi nedeniyle önemli maliyet düşüşlerine olanak tanır.



Şekil 2.10. ELO prosesinin şematik gösterimi [41].

### 3. ELEKTRON SEÇİCİ YAYICI KATMANLARIN GAAS GÜNEŞ HÜCRELERİNE ENTEGRASYONU

Geleneksel III-V grubu güneş hücrelerinde, katkılı bir p-n birleşimi içeren bir taban katmanı ile, pasifleştirme sağlayan ve kontak yeniden birleşmesini azaltan yüksek katkılı geniş bant aralıklı BSF katmanı yer alır. Yük taşıyıcı ayrımı ve toplanmasını sağlamak için yüksek katkılı bir pencere katmanı ve düşük temas dirençli omik kontak elde etmek için yüksek katkılı şapka katmanlarından (cap layer) oluşur [30],[42]. Bu katmanlar için epitaksiyel büyüme koşulları çok iyi geliştirilmiştir. Bu da ~%29 gibi yüksek verimliliklerin elde edilmesini sağlamıştır. Ancak hem MOCVD hem de MBE maliyetli tekniklerdir ve bu nedenle araştırmacılar, TF-VLS (İnce Film - Buhar Sıvı Katı), yakın-aralıklı buhar taşınımı (CSV) [43-44] gibi yeni teknolojiler, ve nanotel heteroepitaksisi gibi daha ucuz büyüme teknikleri geliştirmişlerdir. Bununla birlikte bu teknikler, kontrollü bir p-n bağlantısının oluşumu, düzgün ve kontrollü katkilama, örgü uyumlu pencere katmanı ve BSF katmanı büyümesi ve malzeme ömrünün kısılgı ile ilgili büyüme zorluklarıyla karşı karşıyadır [27], [43-45]. Bu zorlukların çoğu, bu yeni büyüme tekniklerinin MOCVD/MBE kullanan ince film epitaksisi kadar olgunlaşmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük maliyetli büyüme tekniklerinin karmaşıklıklarının ve sınırlamalarının üstesinden gelmek için yeni bir güneş hücresi yaklaşımına ihtiyaç vardır. Aynı zamanda, yüksek performans için epitaksiyel p-n eklemine, pencere katmanına veya BSF'ye dayanmayan, bu katmanların yerine taşıyıcı seçici katmanın kullanılması ile mümkün olmaktadır. Taşıyıcı seçici katmanların kullanılması güneş hücresinde, aynı anda p-n bağlantısı ve yüksek katkılı pencere ve BSF katmanlarının gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır.

Son yıllarda, yüksek verimli bir güneş hücresi üretmek için taşıyıcı seçici kontaklar, katkılı bağlantılara uygun maliyetli ancak verimli bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde, neredeyse tüm yüksek verimli güneş hücrelerinde bir şekilde taşıyıcı seçici kontaklar kullanılmaktadır. Taşıyıcı seçici kontaklar Si ve perovskitler gibi diğer PV (fotovoltaik) teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, III-V grubu hücreler için nispeten yenidir. GaAs ve diğer III-V malzemeler için seçici kontaklar, yüksek verimli güneş hücreleri büyüme teknikleri ile iyi optimize edilebildiği için daha az çalışılmıştır. Ancak, bu tekniklerle geleneksel güneş hücresi yığınının büyütülmesi, büyüme sınırlamaları nedeniyle zordur. Bu durumlarda, Şekil 3.1'deki güneş hücresi yapısında gösterildiği gibi seçici kontaklar etkili bir alternatif oluşturmaktadır.



**Şekil 3.1.** Geleneksel p-n (p-i-n) eklem güneş hücresine alternatif ESC içeren güneş hücresi.

Birçok araştırmada, elektron-seçici tabakaların alttaş tabanlı GaAs güneş hücrelerinin performansını artırmada etkili olduğu gösterilmiştir. Bu tabakaların uygulanmasıyla yüksek açık devre gerilimi, dolum faktörü ve dönüşüm verimliliği elde edilmektedir. Ayrıca, elektron seçici tabakaların entegrasyonu, GaAs güneş hücrelerinin kararlılığını da artırabilir. Elektron-seçici tabakaların GaAs güneş hücrelerine entegrasyonu, katman kalınlığının, arayüz özelliklerinin ve katkı seviyelerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerektirir.

Sonuç olarak, GaAs güneş hücrelerine elektron-seçici tabakaların dahil edilmesi, elektron çekiminin geliştirilmesi ve taşıyıcıların yeniden birleşmesinden kaynaklı kayıplarının azaltılmasıyla hücre performanslarının artırılmasına yönelik bir yaklaşım sunmaktadır.

### 3.1. Elektron Seçici Katman için İnorganik Metal Oksitler

Elektron seçici katmanlar genellikle düşük iş fonksiyonuna sahip yüksek n-tipi katkılı geniş bant aralıklı malzemelerden oluşmaktadır. Son birkaç yıl içinde, taşıyıcı seçiciliği ve taşıyıcı seçici kontaklar sıkça kullanılan terimler haline gelmiştir. Önceden, araştırmacılar heteroeklem terimini iki farklı malzeme arasındaki neredeyse her türlü bağlantı için kullanırlardı. Ancak, güneş hücreleri uygulamalarında bu heteroeklemlerin kullanılma fikri, çoğu durumda taşıyıcı seçici katmanlarıinkiyle benzer bir mantık üzerine kurulmuştur.

Elektron seçici kontak (ESC) çalışmalarına en iyi örneklerden biri, yaygın olarak çalışılmış yüksek verimli ITO/p-InP heteroeklem güneş hücresidir. 1990'larda, ITO/p-InP heteroeklem yapısı oldukça yüksek verimlilikler elde etmek için çok popülerdi. O dönemde, bu tür yüksek verimliliğin ITO ve InP arasında gömülü tek bir eklem oluşumundan kaynaklandığı varsayılıyordu. Ancak, son zamanlarda yapılan çalışmalar, ITO/InP'nin bu kadar yüksek verimliliğinin pasivasyon ve elektron seçiciliğinin birleşik etkisi nedeniyle ortaya çıktığını göstermiştir.

Güneş hücrelerinde metal oksit malzemelerden oluşan elektron seçici tabakalar elektronları seçici bir şekilde taşıma özelliğine sahiptir. Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ ), çinko oksit ( $\text{ZnO}$ ) veya tungsten oksit ( $\text{WO}_3$ ) gibi metal oksitler, iyi elektron taşıma özellikleri ve yüksek geçirgenlikleri sayesinde elektron-seçici tabakalar olarak kullanılmaktadır.

Oksitlere ek olarak, CdS, ZnS ve  $\text{MoS}_2$  gibi sülfürler de InP ve GaAs tabanlı bir heteroeklem güneş hücresi yapmak için kullanılmıştır. Sülfür kullanmanın avantajı,  $10^{10}$ - $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  kadar düşük yüzey kusur yoğunlukları elde etmek için hem InP hem de GaAs için çok yüksek kaliteli pasivasyon sağlayabilmesidir. Saito ve arkadaşları, %17'den daha yüksek verim elde etmek için CdS/InP heteroeklemini başarıyla uygulamıştır. P-tipi InP kullanmışlar ve heteroeklem oluşturmak için ZnO ve ITO bazlı bir TCO ile 40-100 nm kalınlığında bir n-CdS tabakası biriktirmişlerdir. ITO/CdS/InP güneş hücrelerinin ZnO/CdS/InP güneş hücrelerinden daha iyi çalıştığını, çünkü bu güneş hücrelerinin ZnO/CdS/InP güneş hücrelerine kıyasla daha düşük bir temas direnci oluşturduğunu bulmuşlardır. Bu durumun nedeni ITO'nun, ZnO'dan daha fazla katkılanabilir olması ve daha iyi bir temas oluşturmasıdır [46].

### 3.2. Literatür Özeti

Son zamanlarda, ESC'ler, yüksek verimli güneş hücrelerinde alternatif bir geleneksel yayıcı katmanlar için yeni kavramlar olarak ortaya çıkmıştır. Basit fabrikasyon süreçleri ve uygun maliyetli hücre yapıları sunması sayesinde tercih edilmektedir [47-48]. ESC'ler on yıllardır Si güneş hücrelerinde yoğun bir şekilde araştırılmış ve etkileyici sonuçlar sunmuştur [49-55]. III-V güneş hücrelerinde, geniş aralıklı geçiş metal oksitleri düşük maliyetleri ve ortam koşullarındaki kararlılıkları nedeniyle şu anda ESC katmanları olarak ilgi çekmektedir.  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{ZrO}_2$  gibi diğer oksitler, GaAs tabanlı yarı iletken cihazların büyük yüzey pasivasyonu ve spesifik düşük temas direnci için önerilmiştir [56-

57]. Bu metallere ek olarak, CdS, ZnS ve MoS<sub>2</sub> [58-59], gibi bazı sülfid bazlı malzemeler ve CuI [60] gibi diğer inorganik malzemeler GaAs güneş hücrelerinde taşıyıcı seçici kontak katmanları olarak etkili bir şekilde kullanılmıştır. Düşük maliyetli ve yüksek performanslı III-V güneş hücresi hedefleri için, geniş bant aralıklı taşıyıcı seçici kontak malzemeleri III-V güneş hücrelerinde BSF/yayıcı katmanları için potansiyel bir çözüm olarak görünmektedir.

Geniş bant aralığı, yüksek elektron hareketliliği ve toksik olmaması gibi avantajlarıyla ZnO malzemesi perovskit, polimer, Si ve boya duyarlı güneş hücrelerinde kullanılırken [61-65], a-Si:H malzemesinin taşıyıcı seçici kontak olarak kullanılması Si heteroeklem güneş hücreleri için etkileyici performanslara ulaşmıştır [66-67]. Pham ve diğerleri tarafından, GaAs güneş hücreleri için, ön ESC katmanları olarak katkılı a-Si:H ve ZnO katmanları kullanan GaAs tabanlı güneş hücresi konfigürasyonları önerilmiştir. GaAs hücre çalışması, BSF ve pencere katmanları olarak yüksek katkılı ve geniş aralıklı GaInP katmanları kullanan geleneksel GaAs hücre mimarisi ile karşılaştırmalı olarak bu ESC katmanları kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca, optimize edilmiş GaAs hücre konfigürasyonuna dayanarak, %35,16 potansiyel verimliliğe sahip dört terminalli GaAs//Si heteroeklem (SHJ) tandem konfigürasyonu simülasyonu yapılmıştır. Sonuçlar, III-V tabanlı güneş hücrelerinin yüksek verimli ve düşük maliyetli üretimini hedeflemek için büyük bir potansiyel göstermektedir [68].

Tournet ve diğerleri tarafından TiO<sub>2</sub> ve InGaAsP arasındaki arayüzeyin, çeşitli malzeme karakterizasyon teknikleri ile bant hizalamasını belirlemiş ve TiO<sub>2</sub>'nin InGaAsP üzerinde bir ESC olarak iyi iş gördüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca bir TiO<sub>2</sub>/InGaAsP ESC güneş hücresinin performansını göstererek, bunu geleneksel bir p-n eklemi güneş hücresiyle karşılaştırmışlardır. TiO<sub>2</sub>'nin, p-n bağlantılarına olan ihtiyacı azaltarak ve pasivasyon katmanları olarak hareket ederek, aygıt tasarımını ve üretimini önemli ölçüde basitleştirdiği belirtilmiştir. TiO<sub>2</sub>'nin InGaAsP ile elektron seçici bir temas oluşturduğu gösterilmiştir. TiO<sub>2</sub>/InGaAsP güneş hücresi 35,2 mA/cm<sup>2</sup> kısa devre akım yoğunluğu, 0,49 V açık devre voltajı ve %8,9 dönüşüm verimi sergilemiştir [69].

III-V grubundan InP yapısına entegre edilen ESC katmanlı heteroeklem güneş hücreleri ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [70-73]. Bu çalışmalardan birinde InP heteroeklem güneş hücresi için, TiO<sub>2</sub> elektron seçici yayıcı katman olarak kullanılmış ve %19,2 değerinde yüksek dönüşüm verimi elde edilmiştir [74]. InP'nin aksine, metal oksit

ESC'ler kullanan yüksek verimli GaAs güneş hücreleri ile ilgili ise az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, Caban ve diğerleri tarafından, fabrikasyon süreci ve aygıt mimarisi bakımından farklılık gösteren iki tip güneş hücresi (AZO/ZnO/GaAs ve AZO/GaAs) fabrikasyonu gerçekleştirmiş ve bunların özellikleri tartışılmıştır. ZnO ve Al katkılı formu olan AZO (Alüminyum katkılı Çinko Oksit), hem TCO hem de p-tipi GaAs alttaşı için n-tipi ortak olarak kullanılmaları açısından incelenmiş ve bu da p-n heteroeklem tabanlı fotovoltaiik aygıtın oluşturulmasıyla sonuçlanmıştır. Hem ZnO hem de AZO katmanlarını biriktirmek için ALD (Atomik Katman Biriktirme) yöntemi uygulanmıştır. En iyi verim, nispeten yüksek seri ve düşük şönt direncine rağmen, 160 °C de AZO ve 80 °C'de ZnO'nun ALD prosesi ile biriktirilen örneklerde %1,39 dönüşüm verimi elde edilmiştir [75]. Ön ESC olarak geniş aralıklı n-tipi katkılı ZnO tabakası kullanan tek eklemlili bir GaAs güneş hücresi Pham ve diğerleri tarafından önerilmiştir. GaAs yüzeyindeki Ga-O ve As-O bağlarının doğal oksit durumlarını önemli ölçüde azaltarak mükemmel yüzey pasivasyon özellikleri gösteren bir GaAs alttaşı üzerine ince bir ZnO tabakası biriktirmek için ALD yöntemi kullanılmıştır. Ek olarak, n-tipi katkılı ZnO katmanı, deşik taşınmasını engelleyen ve ön tarafta elektron toplanmasını sağlayan ön ESC katmanı olarak işlev görmüştür. Geniş bant aralıklı bir ZnO pencere katmanının kısa dalga boyu aralığında hücrenin ışık emilimini ve built-in potansiyeli arttırdığı gösterilmiş ve yüksek verimli tek eklemlili GaAs hücrelerinde kullanılan geleneksel AlGaAs ön pencere katmanlarına uygun bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır [76].

TiO<sub>2</sub> ve ZnO'ya ek olarak, HfO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZrO<sub>2</sub> gibi diğer oksitler de GaAs için çok düşük spesifik temas direnci elde etmek için kullanılmıştır [56], [77]. Genellikle, çift katmanlı oksitlerin (TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> vb.) tek katmanlı oksitlere kıyasla düşük temas direnci elde etmek için daha uygun olduğu bulunmuştur. Bu oksitlerin birçoğu ayrıca uygun bant hizalaması sağlayabilmektedir [78].

### 3.3. Elektron Seçici Katmanlarda Elektron Taşınımı

GaAs/ESC güneş hücrelerinde, geleneksel p-n eklem güneş hücrelerindeki gibi gelen ışık GaAs soğurucu katmanında elektron-deşik çiftleri oluşturur. Elektronlar, ESC tarafından hücrenin ön tarafında toplanır ve aynı zamanda bir ARC (anti reflective coating) görevi gören ince bir şeffaf iletken oksit (TCO) tabakası aracılığıyla metal ön kontağa doğru taşınır. Deşikler de yük taşıyıcıları ile, arka metal kontakta toplanır. Böylece, elektronlar ve deşikler sırasıyla katot ve anotta toplanır ve bir voltaj üretilir.

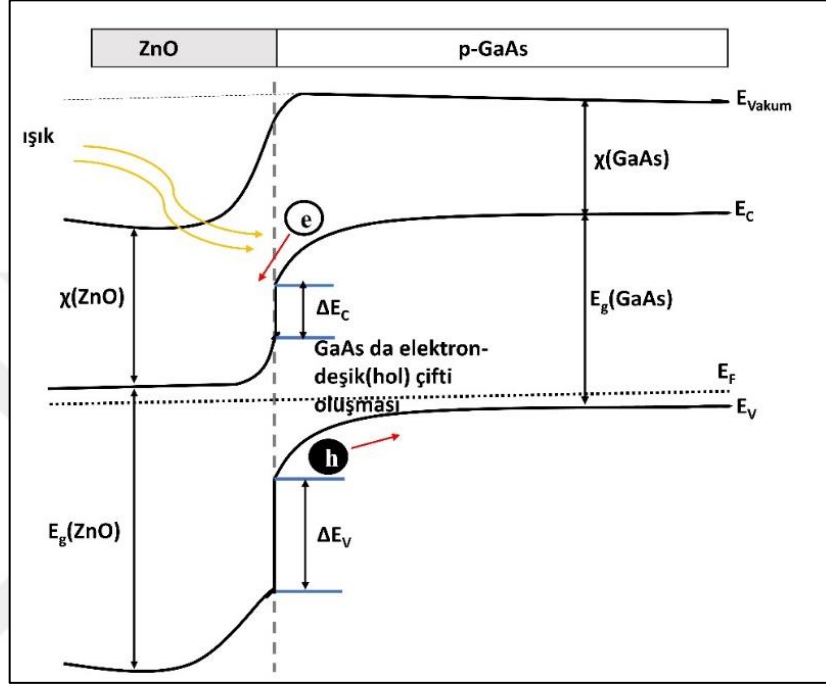
Taşıyıcı seçiciliği elektronlara karşı asimetrik iletkenlik gerektirir, yani elektron seçici bir katman elektronlara karşı oldukça elverişli olmalı, deşiklere karşı ise yüksek direnç göstermelidir. Etkili bir elektron taşıyıcı seçici kontak için, malzeme: geniş bant aralığına sahip, yüksek n-tipi katkılanabilir, soğurucu ile asimetrik bant hizalanmalarını (bant off-set) oluşturabilen ve düşük temas direnci elde edilebilen bir malzeme olmalıdır. Genel olarak, düşük iş fonksiyonlu malzemeler elektron seçici kontak olarak kullanılır.

ESC, soğurucu katmandan daha yüksek bir bant aralığına sahip olmalıdır. Tüm katmanlar bir araya getirildiğinde, düşük bant aralığından (soğurucu katman) yüksek bant aralığına (üst kontak) doğru bir hizalama oluşur. Bu hizalama, soğurucu katmandaki fotonların elektronlarının diğer katmanları geçerek en üst katmana ulaşmasını sağlar. Deşikler ise arka kontağa doğru hareket eder. Elektronlar ve deşiklerin zıt yönlerde hareketi, her iki tarafta da bir potansiyel fark oluşturarak elektrik üretir. Bant aralığı hizalaması doğru yapılmazsa, elektron ve deşik hareketi bozulur ve elektrik üretimi gerçekleşmez.

Farklı bant aralığına sahip iki yarı iletken temas halindeyken bant süreksizliklerine neden olur (değerlik bandı süreksizliği,  $\Delta E_v$  ve iletim bandı süreksizliği,  $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_g = \Delta E_v + \Delta E_c$ ), bu bant süreksizlikleri, aygıtın elektriksel taşıma özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yük taşıma özellikleri (i) bant süreksizliklerine, (ii) arayüz durumlarına ve (iii) potansiyel-bariyer yüksekliğine bağlıdır. ESC'ler deşik transferini engellemek ve elektron akışını sağlamak için aktif tabaka ile büyük bir değerlik bandı ofseti ve küçük bir iletim bandı ofseti sunmalıdır.

ZnO/GaAs heteroeklem güneş hücresinin enerji bandı diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bant hizalamasının özellikleri ve değerler Anderson enerji bandı kuralına göre, XPS verilerinden belirlenebilmektedir. İletim bandı hizalanması ( $\Delta E_c$ ) ve değerlik

bandı ofseti ( $\Delta E_v$ ) aşağıdaki formüllerle ifade edilir.  $E_c$ ,  $E_v$  sırasıyla iletim kenarının altı ve değerlik bandı kenarının üstüdür;  $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_v$  GaAs ve ZnO arasındaki bant hizalaması,  $E_F$  Fermi seviyesini ifade etmektedir. Bant hizalanmasının asimetrisinde:  $\Delta E_v$ ,  $\Delta E_c$ 'den çok daha büyüktür. Formülde;  $\chi$  (eV), malzemenin elektron ilgisidir.  $\Delta E_c$  ve  $\Delta E_v$  birimleri eV dur.



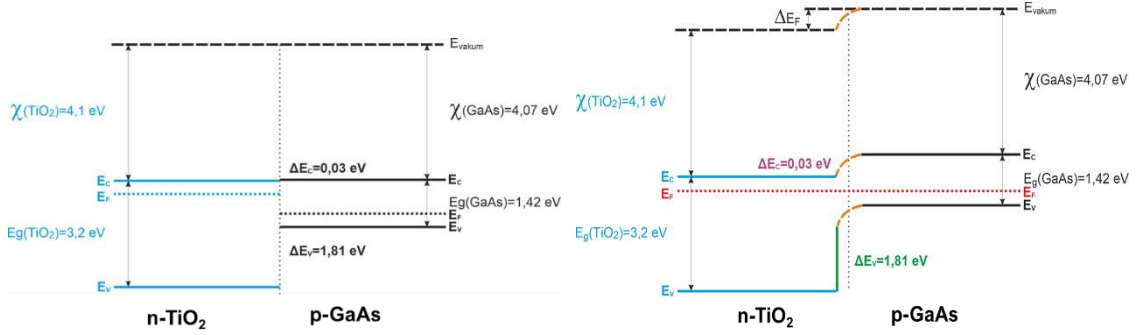
Şekil 3.2. ZnO/GaAs heteroeklem güneş hücresinin enerji bandı diyagramı

$$\Delta E_c = \chi(\text{ZnO}) - \chi(\text{GaAs}) \quad (3.1)$$

$$\Delta E_v = (\chi(\text{ZnO}) + E_g(\text{ZnO})) - (\chi(\text{GaAs}) + E_g(\text{GaAs})) \quad (3.2)$$

Işık altında, fotonlar ZnO katmanından geçer ve GaAs katmanı tarafından soğurulur, bunun sonucunda da GaAs iletim bandında elektronlar üretir. Elektronlar ve deşikler, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi iletim ve değerlik bandı ofsetleri nedeniyle arayüzeyde birikebilir. Şekil 3.2'de açıkça görüldüğü gibi  $\Delta E_v$ ,  $\Delta E_c$ 'den daha yüksek bir değere sahiptir. Bu, n-ZnO'dan, p-GaAs'a elektron aktarımı, p-GaAs'dan n-ZnO'ya deşik aktarımından daha büyük olduğu anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan,  $\text{TiO}_2/\text{GaAs}$  heteroeklem güneş hücresinin hesaplanan enerji bandı diyagramı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.**  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{GaAs}$  hetero eklem oluşturmada önceki enerji bant yapısı (sol),  $\text{TiO}_2/\text{GaAs}$  eklemi oluştuktan sonraki bant diyagramı (sağ).

#### 4. GAAS-ESC KATMANLI GÜNEŞ HÜCRESİ SİMÜLASYONU

Hücre üretim, fabrikasyon ve performans değerlerinin iyileştirilmesinde, üretim süreçlerinden önce aygıt yapılarının tasarımı, modellenmesi ve teorik simülasyonları hem harcanan zamanın ve hem de oluşacak maliyetlerin azaltılmasında oldukça önemlidir. Teorik model üzerinden hücre verimlilik değerleri artırılmaya çalışırken hücre içi işleyişte oluşacak kayıp mekanizmaları ve bu mekanizmaların üstesinden gelme yaklaşımları daha kolay anlaşılabilir. Dolayısıyla günümüzde karmaşık aygıt yapılarının üretilebilmesi önceden yapılacak teorik tasarım ve hesaplamalara tamamen bağımlı hale gelmiştir.

Bu bölümde, yarı GaAs güneş hücresine elektron seçici katman olarak entegre edilen metal oksit katmanlarla oluşturulan hibrit GaAs/ESC güneş hücresi yapılarının teorik tasarımı, modellenmesi ve teorik simülasyon sonuçları sunulmuştur. Bu bölümde elde edilen bulgular doğrultusunda hücre fabrikasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları hem aygıt fabrikasyonu hakkında bilgi vermekte hem de güneş hücresinin gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırma imkanı sağlamaktadır.

##### 4.1. Optik ve Elektriksel Simülasyon

Simülasyon için erişime açık ve ücretsiz olarak kullanılabilen ve Belçika'daki Gent Üniversitesi Elektronik ve Bilgi Sistemleri Bölümü'nde geliştirilmiş SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator) [79] güneş hücresi simülasyon programı kullanılmıştır. SCAPS-1D ilk olarak CuInSe<sub>2</sub> ve CdTe güneş hücreleri için geliştirilmiş olmasına rağmen, diğer Si, GaAs tabanlı III-V grubu ve a-Si malzeme tabanlı güneş hücrelerinin tasarım ve simülasyonunda etkin bir şekilde kullanılabilir. Simülasyon programı, en fazla yedi katman içeren yapıların hesabına izin vermektedir. Program; bant aralığı, elektron ve deşik mobilitesi, elektron ilgisi ve alıcı ve verici katkı yoğunlukları, tünelleme mekanizmaları, katmanların ve katmanlar arası arayüz kusurlarının, yüzey birleşme hızları vb. gibi farklı parametrelerinin tanımlanmasına izin veren kullanışlı bir arayüze sahiptir. Metal kontak katmanlarını, kullanıcı tanımlı iş fonksiyonu ile de tanımlayabilme imkanı sağlamaktadır. Diğer taraftan, kusur konsantrasyonu girdilerine dayanarak, banttan banda (doğrudan), Auger, Shockley-Read Hall (SRH) tipi, yığın ve arayüz yeniden birleşme gibi farklı yeniden birleşme akımlarını hesaplayabilmektedir. Bu programı kullanarak, belirli bir voltajdaki enerji bantları, taşıyıcı konsantrasyonları ve

akımları hesaplanabilir ve voltaja karşı akım yoğunluğu (J-V) grafiği elde edilir. Program kullanıcıya, güneş hücresinin akım-voltaj (J-V), kuantum verimlilik (QE), enerji bant yapısı, yüzeyden itibaren derinliğe bağlı olarak taşıyıcı oluşumu ve taşıyıcı kayıplarını kullanıcıya grafik olarak sunmaktadır. Oluşturulan eğrilerden elde edilen aygıt parametreleri ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF ve PCE (güç dönüşüm verimi)) değerlerini aynı anda kullanıcıya vermektedir [80-81].

SCAPS 1-D programı temel yarı iletken denklemlerini 1-boyutlu olarak çözmektedir. Temel yarı iletken denklemleri Poisson denklemi, elektronlar ve deşikler için süreklilik denklemleri ve sürüklenme-difüzyon denklemleridir. Poisson denklemi aşağıda verilen formüllerle ifade edilmektedir. Eşitliklerde: elektron ve deşiğin, süreklilik denklemi (4.1), sürüklenme ve difüzyon ile taşıyıcıların taşınma denklemleri (denklem 4.2 ve 4.3) uygun sınır değerleri, taşıyıcı üretimi ve birleşme mekanizmaları vb. yerine konularak çözülmektedir. Bu denklemlerin çözümlerinden aygıt parametreleri elde edilmektedir.

$$\frac{d}{dx} \left( -\varepsilon(x) \frac{d\psi}{dx} \right) = q[p(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x)] \quad (4.1)$$

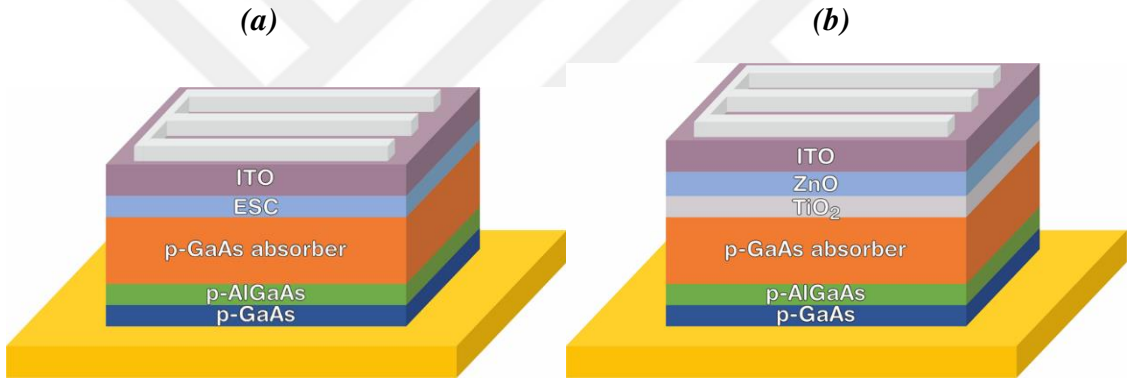
$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = q \left( R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = -q \left( R_p - G + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (4.3)$$

Denklemlerde  $\varepsilon$  dielektrik sabiti (permitivite ya da elektriksel geçirgenlik),  $q$  elektron yükü,  $\psi$  elektrostatik potansiyel,  $n$  toplam elektron yoğunluğu,  $p$  toplam deşik yoğunluğu,  $N_d^+$  iyonize donör katkı konsantrasyonu,  $N_a^-$  iyonize alıcı katkı konsantrasyonu,  $J_n$  ve  $J_p$  sırasıyla elektron ve deşik akım yoğunluklarını,  $R_n$  ve  $R_p$  sırasıyla birim hacim başına elektron ve deşik için net yeniden birleşme oranlarını ve  $G$  birim hacim başına üretim hızını ifade etmektedir.  $x$  ise ön yüzeyden itibaren aygıtın kalınlığını belirtmektedir.

Teorik olarak yapılan çalışmada GaAs güneş hücresinde elektron seçici katmanın kullanıldığı Şekil 4.1'de gösterilen iki farklı aygıt yapısının simülasyonu yapılmıştır. Şekil 4.1a'daki birinci aygıt yapısında, TCO olarak ITO, ESC olarak  $TiO_2$  ve ZnO ayrı ayrı, soğurucu katman olarak p-GaAs, arka yüzey alanı (BSF) olarak p-AlGaAs ve arka kontak katmanı olarak p-GaAs kullanılmıştır. Şekil 4.1b'deki ikinci aygıt yapısında ise

aygıtın diğer tasarım parametreleri ilk grup aygıtlarla (Şekil 4.1a) aynı olmak üzere sadece ESC katmanını olarak  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  ikili yapısı kullanılmıştır. Hibrit hücrelerin performansını karşılaştırabilmek için ayrıca p-n eklem GaAs referans hücrelerin hesaplamaları da gerçekleştirilmiştir.  $\text{TiO}_2$ , ZnO ve  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  ESC katmanların kalınlık değişimlerinin hücre performansına etkisi incelenmiştir ve tüm aygıt yapılarında ITO kalınlığı 75 nm olarak sabit alınmıştır. Tüm aygıt yapılarında (referans hücre dahil) öncelikle hücre yapılarının tamamının yüzey yansımaları 300 nm – 900 nm aralığında hesaplanarak SCAPS programına veri olarak girilmiştir. Ayrıca tüm hücre yüzeylerinin mükemmel bir yansıtma önleyici katmanla kaplandığı durum içinde yansıma değeri 0 olarak girilip teorik limit performansları karşılaştırmalı bir şekilde hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalar standart aydınlatma ( $\text{AM } 1.5\text{G } 1.000 \text{ W/m}^2$ , 300 K) altında yapılmıştır.



**Şekil 4.1.** Teorik hesaplamalarda kullanılan hibrit GaAs/ESC hücre yapılarının yan kesitten görünümü: (a) GaAs güneş hücre yapısı-1, tek katman ESC (ESC:  $\text{TiO}_2$  veya ZnO) (b) GaAs güneş hücresi yapısı-2, çift katman ESC (ESC:  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$ )

Yarı iletken malzemelerin parametreleri yayınlanmış deneysel sonuçlardan veya çevrimiçi veri tabanlarından elde edilmiştir [82-89]. Simülasyon sırasında kullanılan parametreler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablolarda,  $\chi$  elektron ilgisi,  $E_g$  bant aralığı,  $\epsilon_r$  bağıl permitivite,  $N_c$  ve  $N_v$  iletim ve değerlik bandı durum yoğunluğu,  $\mu_n$  elektron mobilitesi,  $\mu_p$  deşik mobilitesi,  $N_A$  alıcı yoğunluğu,  $N_D$  ise verici yoğunluğudur. Elektron ve deşğin termal hızı  $10^7 \text{ cm/s}$  olarak alınmıştır. Simülasyonda GaAs soğurucu katmanının radyatif yeniden birleşme katsayısı foton geri dönüşüm etkisini de hesaba katabilmek için  $2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$  olarak alınmıştır. Ön metal kontak (Ag) için iş fonksiyonu 4,32 eV, arka metal kontak (Au) için iş fonksiyonu 5,47 olarak alınmıştır. GaAs için

elektron ve deşik mobiliteleri, 300 K sıcaklıkta katkı yoğunluklarına bağılı olarak literatürde yer alan modellerden elde edilen verilere dayandırılmıştır [89-90].

**Tablo 4.1.** GaAs/ESC hibrit hücre yapısının GaAs tabanlı katmanlarının temel simülasyon parametreleri

| Parametre                     | p+Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As | p-GaAs                             | p+GaAs kontak          |
|-------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| Kalınlık (nm)                 | 30                                       | 1.500                              | 40                     |
| $E_g$ (eV)                    | 1,81                                     | 1,42                               | 1,42                   |
| $\chi$ (eV)                   | 3,74                                     | 4,07                               | 4,07                   |
| $\epsilon_r$                  | 9,048                                    | 12,9                               | 13,18                  |
| $N_c$ (cm <sup>-3</sup> )     | 2,2x10 <sup>18</sup>                     | 4,7x10 <sup>17</sup>               | 4,7 × 10 <sup>17</sup> |
| $N_v$ (cm <sup>-3</sup> )     | 1,8x10 <sup>19</sup>                     | 9,0x10 <sup>18</sup>               | 9,8 × 10 <sup>18</sup> |
| $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs) | 2.300                                    | 3.040                              | 2.000                  |
| $\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /Vs) | 150                                      | 265                                | 350                    |
| $N_D$ (cm <sup>-3</sup> )     | 0                                        | 0                                  | 0                      |
| $N_A$ (cm <sup>-3</sup> )     | 5x10 <sup>18</sup>                       | 10 <sup>16</sup> -10 <sup>17</sup> | 1x10 <sup>19</sup>     |

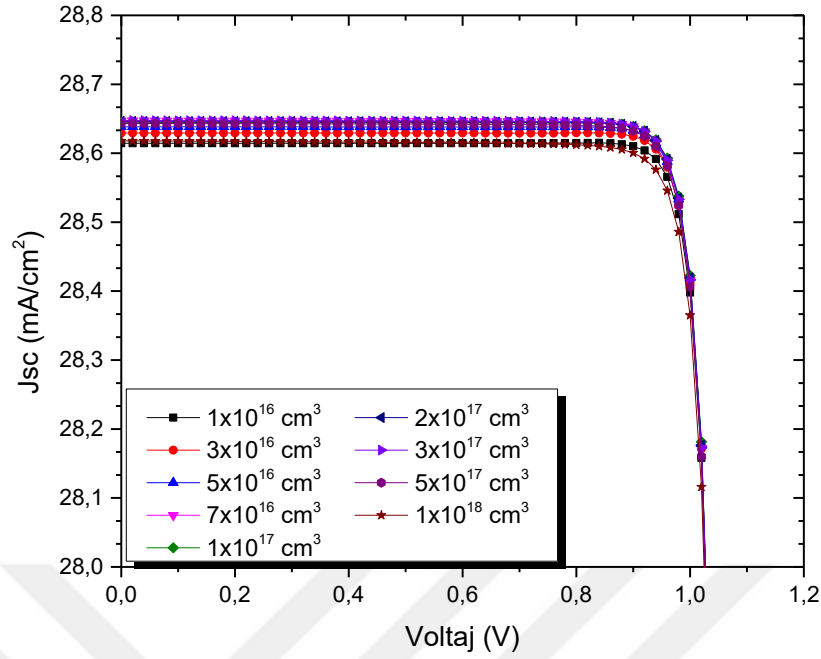
**Tablo 4.2.** GaAs/ESC hibrit hücre yapısının ESC ve TCO katmanlarının temel simülasyon parametreleri

| Parametre                     | TiO <sub>2</sub>     | ZnO                  | ITO                  |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Kalınlık (nm)                 | 1-20                 | 1-20                 | 75                   |
| $E_g$ (eV)                    | 3,20                 | 3,34                 | 3,65                 |
| $\chi$ (eV)                   | 4,1                  | 3,9                  | 4,5                  |
| $\epsilon_r$                  | 9                    | 9                    | 9                    |
| $N_c$ (cm <sup>-3</sup> )     | 2,2x10 <sup>18</sup> | 2,2x10 <sup>18</sup> | 2x10 <sup>18</sup>   |
| $N_v$ (cm <sup>-3</sup> )     | 1,8x10 <sup>19</sup> | 1,8x10 <sup>19</sup> | 1,8x10 <sup>19</sup> |
| $\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs) | 4                    | 100                  | 20                   |
| $\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /Vs) | 2                    | 25                   | 10                   |
| $N_D$ (cm <sup>-3</sup> )     | 1x10 <sup>17</sup>   | 1x10 <sup>18</sup>   | 1x10 <sup>19</sup>   |
| $N_A$ (cm <sup>-3</sup> )     | 0                    | 0                    | 0                    |

#### 4.2. GaAs/TiO<sub>2</sub> Güneş Hücresi Simülasyonu

GaAs tabanlı esnek ince film güneş hücrelerinde ESC olarak TiO<sub>2</sub> kullanımının potansiyelini göstermek amacıyla, p-GaAs/n-TiO<sub>2</sub>/ITO (Şekil 4.1a) aygıt yapısının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. TiO<sub>2</sub> katman kalınlığı 1 ile 20 nm arasında değiştirilmiş ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Bu kalınlık aralıklarındaki TiO<sub>2</sub> katmanı ile diğer katmanların (ITO ve GaAs) kalınlıkları ve kırılma indisleri dikkate alınarak, 300-900 nm aralığında yansıma değerleri açık erişimli bir yansıma hesaplayıcı [91] kullanılarak hesaplanmış ve simülasyona dahil edilmiştir. Bu şekilde, yansıma kayıpları dahil edilerek kuantum verim sonuçları analiz edilmiştir. Tüm simülasyonlar boyunca, ITO kalınlığı 75 nm olarak sabit tutulmuştur. ESC TiO<sub>2</sub> katmanının değişen kalınlıklarına göre hesap yapılmadan önce, 5 nm sabit TiO<sub>2</sub> kalınlığında öncelikle soğurucu p-GaAs katmanının katkı yoğunluğunun hücre performansına etkisi  $1 \times 10^{16}$ - $1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> aralıkta hesaplanarak incelenmiş ve sonraki hesapların tamamında soğurucu katmanının katkı yoğunluğu  $1 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> olarak girilmiştir.

GaAs/ESC hücrelerin simülasyonu öncesi soğurucu katman olan p-GaAs katkı yoğunluğunun hibrit hücreler üzerindeki etkisini görmek için, öncelikle soğurucu katmanının değişen katkı yoğunluğunda sabit (5 nm) TiO<sub>2</sub> kalınlığında hücrelerin hesabı yapılmış elde edilen J-V eğrisi Şekil 4.2’de ve hücre parametreleri Tablo 4.3’te sunulmuştur. Yapılan simülasyonda hücre ön yüzey yansıması hesaba katılmıştır. Simülasyon sonucuna göre belirlenen aralıkta soğurucu bölgenin katkı değişiminin hücre performansı üzerinde ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bu bilgi sonucu sonraki GaAs/ESC hücre hesaplarının tamamında katkı seviyesi limitlerinin ortalama değeri olan  $1 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> değeri soğurucu bölgenin katkı seviyesi olarak belirlenmiştir.



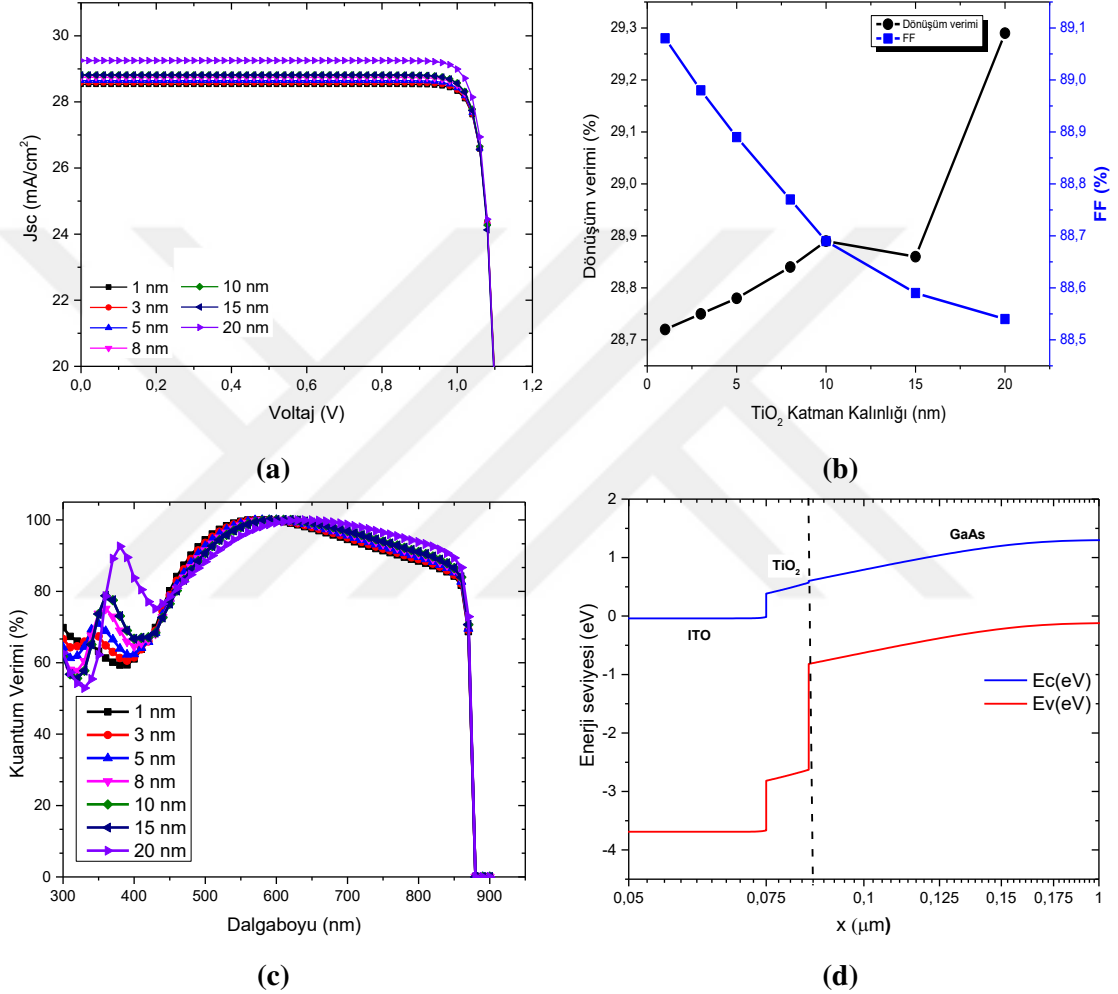
**Şekil 4.2.** GaAs soğurucu katmanın  $1 \times 10^{16}$ -  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  arası farklı katkı yoğunluklarının ESC(TiO<sub>2</sub>) katmanı 5 nm kalınlıkta sabit tutulan hibrit hücreye etkisinin J-V eğrisi.

**Tablo 4.3.** GaAs soğurucu katmanın  $1 \times 10^{16}$ -  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  arası farklı katkı yoğunluklarının ESC(TiO<sub>2</sub>) katmanı 5 nm kalınlıkta sabit tutulan hibrit hücreye etkisinin performans parametreleri.

| $N_A (\text{cm}^{-3})$ | $V_{oc} (\text{V})$ | $J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$ | FF (%) | Dönüşüm verimi (%) |
|------------------------|---------------------|---------------------------|--------|--------------------|
| $1 \times 10^{16}$     | 1,130               | 28,61                     | 88,92  | 28,75              |
| $3 \times 10^{16}$     | 1,130               | 28,63                     | 88,92  | 28,77              |
| $5 \times 10^{16}$     | 1,130               | 28,64                     | 88,91  | 28,78              |
| $7 \times 10^{16}$     | 1,130               | 28,64                     | 88,81  | 28,75              |
| $1 \times 10^{17}$     | 1,130               | 28,64                     | 88,89  | 28,78              |
| $2 \times 10^{17}$     | 1,130               | 28,65                     | 88,87  | 28,77              |
| $3 \times 10^{17}$     | 1,130               | 28,65                     | 88,85  | 28,77              |
| $5 \times 10^{17}$     | 1,130               | 28,64                     | 88,81  | 28,75              |
| $1 \times 10^{18}$     | 1,130               | 28,62                     | 88,73  | 28,70              |

Simülasyonu yapılan ESC katmanlı hibrit p-GaAs/TiO<sub>2</sub>/ITO güneş hücresinin farklı kalınlıklardaki TiO<sub>2</sub> J-V eğrisi ve enerji dönüşüm verimlilik performansları Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlarda hücrelerin ön yüzeyinden yansımalar hesaba dahil edilmiştir (herhangi yansıtma önleyici katman/katmanlar kullanılmamıştır). Şekil 4.3a'daki J-V karakteristik eğrilerine göre, en iyi performansın TiO<sub>2</sub> katmanının 20

nm kalınlığında elde edildiği ve 1 ile 20 nm arasındaki kalınlıklarda performansın çok benzer olduğu,  $V_{OC}$  değerlerinin ise yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.3b'ye göre,  $TiO_2$  katmanı kalınlığı 20 nm'ye kadar arttığında FF azalmakta ve %89,08'den %88,58'e düşmektedir. Bu kalınlıkta (20 nm) en yüksek dönüşüm verimi yaklaşık %29,3 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.3.** Farklı  $TiO_2$  katman kalınlıklarında GaAs/ESC hücrelerin teorik simülasyondan elde edilen eğrileri : (a)  $J-V$  eğrileri, (b) Dönüşüm verimi-FF (c) Kuantum verimi (QE) (d) Enerji bant hizalanması diyagramı.

Şekil 4.3c'de, 300-900 nm dalga boyu aralığında, farklı  $TiO_2$  kalınlıklarında hücrelerin QE grafikleri verilmiştir. Hücreler üzerine herhangi bir yansıtma önleyici katman uygulanmadığı için UV ve kızıl ötesi kayıplar doğrudan yüzeyden yansıyan ışık spektrumu ile örtüşmektedir. Kalınlığa göre her iki bölgede farklılık gösteren verimlilik değeri değişimi ise doğrudan  $TiO_2$  kalınlığına göre hücre yüzeylerinde oluşan yansımaların

da değişimi ile alakalıdır. GaAs/TiO<sub>2</sub> arayüzeyine eklenen  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  kusur yoğunluğu ve TiO<sub>2</sub> malzeme deki  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  kusur yoğunluğuna rağmen yansıma etkisi çıkarıldığında ESC katman kalınlığına göre QE değerlerinde ciddi bir fark gözlenememiştir. şekil 4.3d’de ise, TiO<sub>2</sub> katmanlı GaAs aygıtının aydınlatma altında elde edilen bant diyagramını göstermektedir. x eksenı, nm veya m cinsinden, güneş hücresinin en st katmanından itibaren katman derinliğini ifade etmektedir. Bant diyagramındaki dikleşen çizgiler, bant hizalanmalarını göstermektedir. Burada, deşiklerin gördüğü bariyer 1,81 eV iken elektronların gördüğü bariyerin -0,03 eV olduğu görülmektedir. Asimetrik enerji bant hizalanması TiO<sub>2</sub>’in GaAs tabanlı hücreler için iyi bir ESC olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla soğurucu bölgede üretilen elektronlar kolayca kendi kontaklarına taşınabilirken çoğunluk taşıyıcı olan deşiklerin yüksek bariyerden dolayı ara yzeve ve ESC katmana difüz etmesinin ve elektron deşik birleşmesiyle taşıyıcı kaybının hücre n yüzey bölgesinde engellendiği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.4’te GaAs/ESC (TiO<sub>2</sub>) hibrit hücrenin simülasyon verilerinden elde edilen hücre parametreleri verilmiştir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının açık devre üzerinde herhangi bir etkisi görülmemiştir. Kısa devre akımında görülen küçük değişikliklerin (kalınlıkla değişen küçük monoton artış) ise TiO<sub>2</sub> kalınlığıyla değişen yüzey yansıması ile alakalı olduğu gzlmektedir. Dolum faktöründe kısa devre akımının aksine gözlenen monoton azalmadan dolayı ESC katman kalınlığının enerji dönüşüm verimine açık bir etkisi gözükmemektedir. Ancak ESC katman kalınlığının 10 nm ve üzeri değerlerinde çok cüzi bir artış gzlmektedir. UV bölgede artan ESC kalınlığıyla birlikte bant aralığı üzeri fotonların ESC katmanındaki soğurulmasında beklenen artışla birlikte verimlilik değerinde bir miktar azalma beklenirken, 75 nm ITO katman sabit tutulurken değişen yansıma değeri bu etkinin açıkça gözlemlenmesini perdelediği düşünülmektedir.

**Tablo 4.4.** Farklı  $\text{TiO}_2$  katman kalınlıklarında  $\text{GaAs}/\text{TiO}_2$  güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.

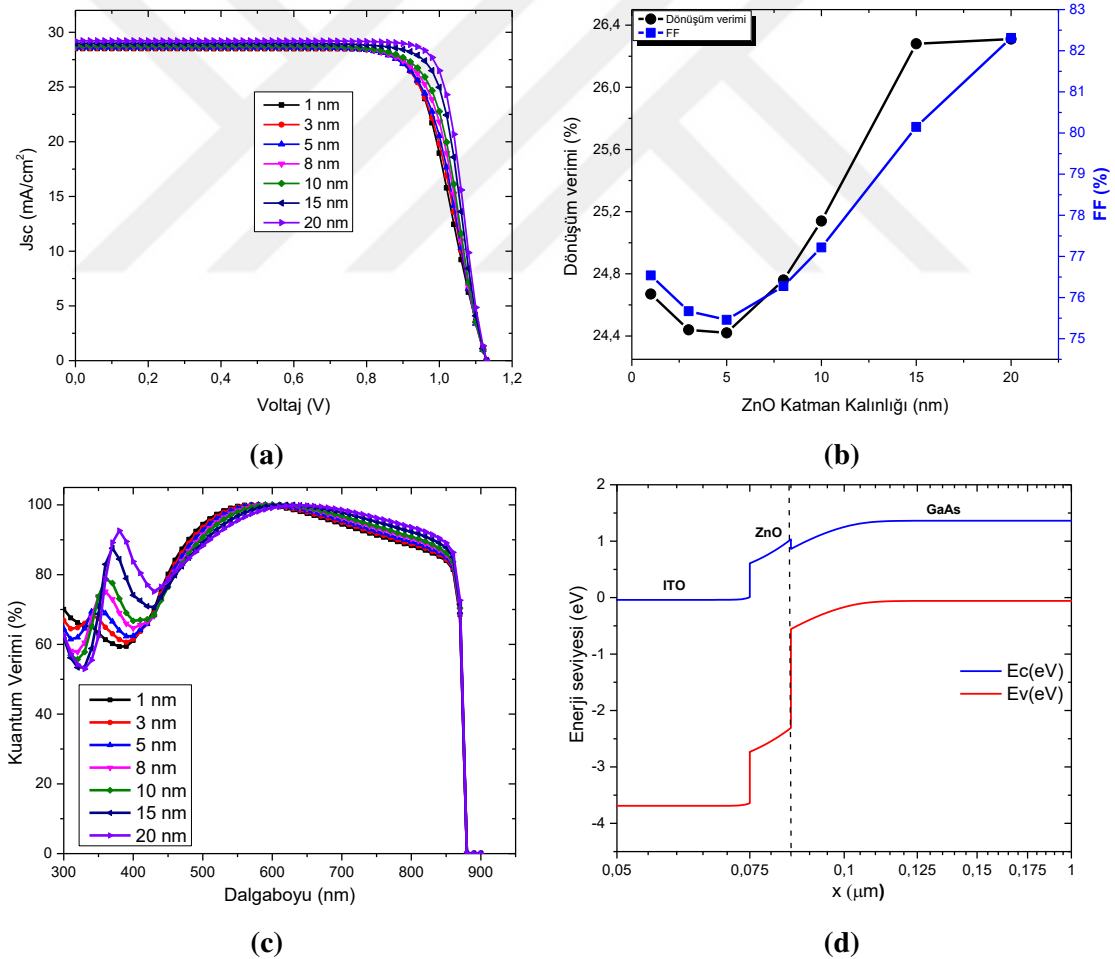
| $\text{TiO}_2$ kalınlık (nm) | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | FF (%) | Dönüşüm verimi (%) |
|------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------|--------------------|
| 1                            | 1,130        | 28,53                                | 89,08  | 28,72              |
| 3                            | 1,130        | 28,58                                | 88,98  | 28,75              |
| 5                            | 1,130        | 28,64                                | 88,89  | 28,78              |
| 8                            | 1,130        | 28,74                                | 88,76  | 28,74              |
| 10                           | 1,130        | 28,81                                | 88,69  | 28,89              |
| 15                           | 1,130        | 28,81                                | 88,59  | 28,86              |
| 20                           | 1,131        | 29,25                                | 88,54  | 29,29              |

#### 4.3. $\text{GaAs}/\text{ZnO}$ Güneş Hücresi Simülasyonu

$\text{ZnO}$ 'nun  $\text{GaAs}$  güneş hücresinde elektron seçici kontak olarak kullanımı ve olası potansiyelini teorik olarak görebilmek için, Şekil 4.1a'da verilen p- $\text{GaAs}/\text{n-ZnO}/\text{ITO}$  aygıt yapısının simülasyonu yapılmıştır.  $\text{ZnO}$  katman kalınlığı,  $\text{TiO}_2$  katman kalınlıklarıyla aynı şekilde, 1 ile 20 nm arasında değiştirilmiş, hücrenin  $\text{GaAs}$  tabanlı yarı kısmı aynı alınmış ve sonuçlar sunulmuştur. ITO kalınlığı yine 75 nm olarak sabit alınmış,  $\text{ZnO}$ 'in getirdiği optik indeks değişimine göre herhangi bir yüzey yansıması iyileştirilmesi yapılmamıştır. Hesaba dahil edilen yüzey yansıması 75 nm ITO kalınlığıyla aynı  $\text{TiO}_2$  ESC katmanlı hücrelerde olduğu gibi değişen ESC ( $\text{ZnO}$ ) kalınlığı ile hesaplanarak simülasyona eklenmiştir.

Farklı  $\text{ZnO}$  kalınlıklarında  $\text{GaAs}/\text{ZnO}/\text{ITO}$  güneş hücrelerinin hesaplan eğrileri Şekil 4.4'te ve hesaplamadan elde edilen hücre parametreleri ise Tablo 4.5'te verilmiştir. Hücrelerin J-V karakteristiğine bakıldığında  $\text{GaAs}/\text{TiO}_2$  göre daha yüksek bir seri direnç etkisi gözükmemektedir.  $\text{TiO}_2$  te elektronlar soğurucu bölgeden kontağa gidişte herhangi bir bariyer görmezken  $\text{ZnO}$  içeren hücrelerde yaklaşık 0,17 eV'luk bir bariyerle karşılaşmaktadır. Bariyerin etkisi kendini bariz bir şekilde  $\text{GaAs}/\text{TiO}_2$  hücrelerle karşılaştırıldığında FF üzerinde göstermektedir. Dolayısıyla  $J_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerleri birbirine çok yakın olsa da düşük FF değerinden dolayı  $\text{ZnO}$ 'lu hücreler daha düşük verimlilik değerlerinde kalmaktadır. Hücrelerin enerji dönüşüm verimliliği  $\text{ZnO}$  kalınlığıyla önce bir miktar azalırken sonrasında monoton bir şekilde artış göstererek 20 nm  $\text{ZnO}$  kalınlığında %27,21 değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.4b'ye bakıldığında verimlilik davranışının doğrudan FF davranışını takip ettiği açıkça görülmektedir.  $\text{ZnO}$  kalınlığının

$V_{OC}$  değeri üzerine herhangi bir etkisi olmasa da hücrelerin  $J_{SC}$  değerleri artan ZnO kalınlığı ile az miktarda monoton bir artış göstermektedir. Bu kısmi artışın nedeni artan ZnO kalınlığı ile yüzey yansımalarının artan kalınlıkla bir miktar azalması olarak değerlendirilmektedir. Tüm hücrelerin QE tayfı  $TiO_2$ 'li hücrelerinkine benzer şekilde yüzey yansımalarını takip eden bir davranış sergilemektedir. Enerji bant hizalanması açısından GaAs/ $TiO_2$  hücreline benzer bir hizalanma gösterse de (Şekil 4.3d ve Şekil 4.4d)  $TiO_2$  içeren hücrede elektron bariyeri yokken bu hücrelerde 0,17 eV civarındadır. Deşiklerin gördüğü bariyer seviyesi ise 1,75 eV civarında olup  $TiO_2$ 'li hücrelerle neredeyse aynı enerji yüksekliğine sahiptir. Literatürden alınan değerler doğrultusunda yapılan hesaplamalarda  $TiO_2$  malzemenin ZnO malzemeye göre daha iyi bir ESC davranışı sergilediği görülmektedir.



**Şekil 4.4.** Farklı ZnO katman kalınlıklarında GaAs/ESC hücrelerin teorik simülasyondan elde edilen eğrileri : (a) J-V eğrileri, (b) Dönüşüm verimi-FF (c) Kuantum verimi (QE) (d) Enerji bant hizalanması diyagramı.

**Tablo 4.5.** Farklı ZnO katman kalınlıklarında GaAs/ZnO güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.

| ZnO kalınlık (nm) | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Dönüşüm verimi (%) |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|--------------------|
| 1                 | 1,131               | 28,51                                 | 76,55  | 24,67              |
| 3                 | 1,131               | 28,56                                 | 75,67  | 24,44              |
| 5                 | 1,131               | 28,62                                 | 75,46  | 24,42              |
| 8                 | 1,131               | 28,71                                 | 76,28  | 24,77              |
| 10                | 1,131               | 28,78                                 | 77,22  | 25,14              |
| 15                | 1,131               | 28,99                                 | 80,15  | 26,28              |
| 20                | 1,131               | 29,22                                 | 82,31  | 27,21              |

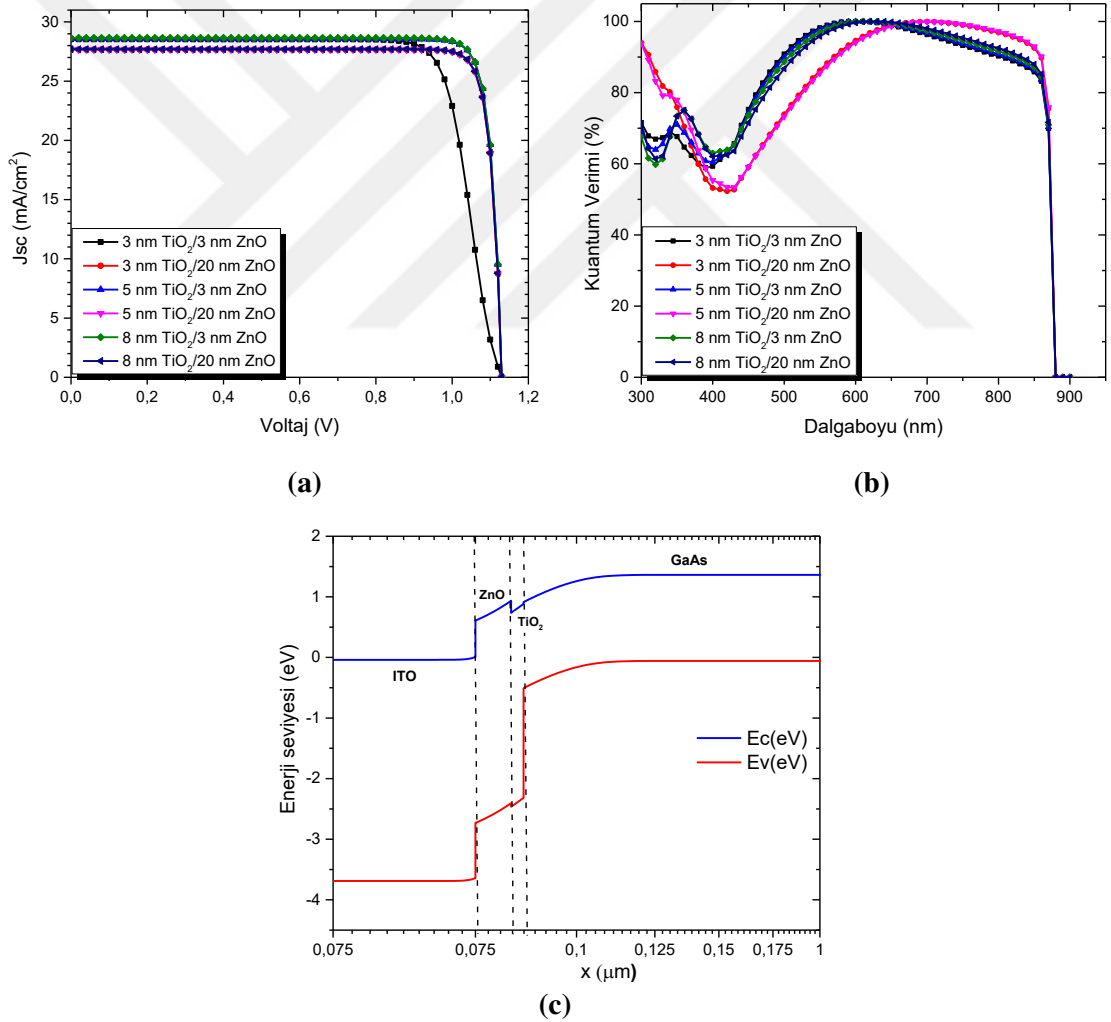
#### 4.4. GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO Güneş Hücresi Simülasyonu

Kompozit iki farklı katman içeren ESC tasarımının hücre verimliliği üzerine etkisini görmek için GaAs üzerine arayüz oluşturacak şekilde önce TiO<sub>2</sub> sonra da onun üzerine ZnO katman eklenip (Şekil 4.1b) ITO kalınlığı önceki hücre yapılarında olduğu gibi 75 nm olacak şekilde farklı TiO<sub>2</sub>/ZnO kalınlıklarında simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonda TiO<sub>2</sub> kalınlığı 3 nm, 5 nm ve 8 nm olarak sabit tutulmuş ve her bir TiO<sub>2</sub> kalınlığı için ZnO kalınlığı 3 – 20 nm aralığında taranmıştır. GaAs tabanlı yarı hücre parametreleri diğer tek katman ESC içeren hücrelerle aynı alınmıştır. Diğer hücrelerde olduğu gibi her değişen kalınlık için hücre yüzeyinden yansıma tayfi hesaplanıp simülasyon programına dışarıdan ön yüzey yansıması olarak girilmiştir.

İkili katman ESC içeren bu hücrelerin J-V ve QE grafikleri Şekil 4.5 ve hesaplanan hücre parametreleri Tablo 4.6’da verilmiştir. Grafikte karmaşıklığı azaltmak için her sabit TiO<sub>2</sub> kalınlığı için sadece en ince ve en kalın ZnO içeren hücrelerin elde edilen J-V ve QE eğrileri konmuştur. Diğer aralıktaki değerler tabloda hücre parametreleri üzerinden sunulmuştur.

TiO<sub>2</sub> kalınlığının 3 nm olduğu hücrelerde artan ZnO kalınlığıyla birlikte J<sub>sc</sub> ve V<sub>oc</sub> değerlerinde ZnO soğurmasıyla çok küçük azalışlar olasına rağmen verimlilik değeri monoton bir artış sergilemiştir. Bu artışın sebebi ZnO kalınlığıyla daha baskın bir şekilde artan FF olduğu açıkça görülmektedir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının 5 ve 8 nm ye çıktığı hücre yapılarında değişen ZnO kalınlığı hücre parametreleri üzerinde küçük değişimler dışında fazla etkin olmamıştır. Teorik modele göre iki katman yapıda TiO<sub>2</sub> kalınlığının 3 nm’nin üzerinde olması gerektiği gözükmemektedir. Yüzey yansımasının dahil edildiği (sabit 75 nm

ITO kalınlığında) hesaplamalar sonucu ikili katman yaklaşımı verimlilik ve hücre parametreleri açısından tek katman  $\text{TiO}_2$  hücrelerle birbirine yakın değerler göstermektedir. Tek katman ZnO içeren hücrelerle de benzer  $J_{SC}$  ve  $V_{OC}$  değerine sahip olan çift katman ESC'li hücreler tek katman ZnO'lu hücelere göre daha yüksek verimlilik göstermektedir. Tek katman ZnO içeren hücrelerin görece düşük performans göstermesi önceki bölümde anlatıldığı gibi yüksek elektron bariyeri kaynaklı düşük FF değerleridir. Bu üç hücrenin daha sağlıklı karşılaştırıldığı durum olan yansıma farklılıklarının etkisinin giderildiği daha sağlıklı karşılaştırılması sonraki bölümde verilmiştir ve her üç hücre yapısı da bu etki çıkarıldığında verimlilik ve hücre parametreleri açısından yakın değerlere sahiptirler.



**Şekil 4.5.**  $\text{GaAs}/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  güneş hücresi için (a)  $J$ - $V$  eğrisi. (b) Kuantum verimi ( $QE$ ) (c) Enerji bant hizalanması diyagramı.

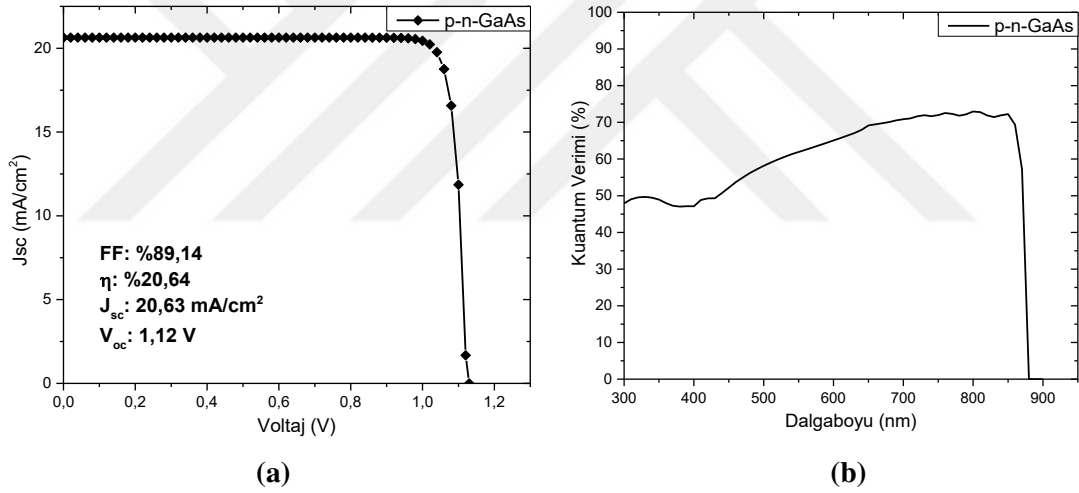
**Tablo 4.6.** Farklı  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{ZnO}$  katman kalınlıklarında  $\text{GaAs}/\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  güneş hücrelerinin teorik simülasyondan elde edilen performans parametreleri.

| $\text{TiO}_2$ kalınlık (nm) | $\text{ZnO}$ kalınlık (nm) | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Dönüşüm verimi (%) |
|------------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------|--------|--------------------|
| 3                            | 3                          | 1,131        | 28,53                          | 79,82  | 25,74              |
| 3                            | 5                          | 1,130        | 28,48                          | 79,89  | 25,73              |
| 3                            | 8                          | 1,130        | 28,38                          | 80,50  | 25,83              |
| 3                            | 10                         | 1,129        | 28,29                          | 89,16  | 28,51              |
| 3                            | 15                         | 1,129        | 28,02                          | 89,19  | 28,23              |
| 3                            | 20                         | 1,129        | 27,67                          | 89,20  | 27,87              |
| 5                            | 3                          | 1,130        | 28,57                          | 88,96  | 28,72              |
| 5                            | 5                          | 1,130        | 28,52                          | 89,04  | 28,69              |
| 5                            | 8                          | 1,130        | 28,41                          | 89,12  | 28,61              |
| 5                            | 10                         | 1,129        | 28,31                          | 89,15  | 28,52              |
| 5                            | 15                         | 1,129        | 28,02                          | 89,18  | 28,23              |
| 5                            | 20                         | 1,129        | 27,67                          | 89,19  | 27,87              |
| 8                            | 3                          | 1,130        | 28,65                          | 88,85  | 28,77              |
| 8                            | 5                          | 1,130        | 28,59                          | 88,98  | 28,75              |
| 8                            | 8                          | 1,130        | 28,46                          | 89,09  | 28,66              |
| 8                            | 10                         | 1,129        | 28,36                          | 89,13  | 28,57              |
| 8                            | 15                         | 1,129        | 28,06                          | 89,18  | 28,27              |
| 8                            | 20                         | 1,129        | 27,70                          | 89,19  | 27,90              |

#### 4.5. p-n Eklem Referans GaAs Güneş Hücresi Simülasyonu

GaAs/ESC güneş hücreleri ile geleneksel p-n eklem güneş hücrelerinin fotovoltaiik parametrelerini ve performanslarını karşılaştırmak amacıyla geleneksel esnek ince film GaAs referans hücrenin de simülasyonu yapılmıştır. Tezin amaçlarından bir tanesi GaAs tabanlı hücrenin yarısını epitaksiyel olarak oluştururken diğer yarısını epitaksiyel olmayan ucuz ve ince malzemelerle oluşturmaktır. Bir diğer amacı ise geleneksel p-n eklem GaAs hücrede özellikle UV bölgeye doğru optik pencerede soğurma ile kaybedilen fotonların yüksek bant aralıklı malzeme kullanılarak etkin bir şekilde hücre performansını arttırmaktır. p-n eklem GaAs hücrenin soğurucu bölge ve arka kontak katmanları GaAs/ESC hücrelerde kullanılan yarı GaAs hücreler ile aynı parametrelerde tutulmuştur (Tablo 4.1). p-n eklem oluşturmak için soğurucu p-GaAs üzerine sırasıyla; 200 nm n-GaAs yayıcı ve 45 nm n-AlGaAs optik pencere katmanı eklenmiştir. Yayıcı katman için

$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğu kullanılırken, optik pencere katmanı için  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğu kullanılmıştır. GaAs/ESC hücrelerde olduğu gibi herhangi bir yansıtma önleyici katman/katmanlar kullanılmamıştır. Hücre ön yüzeyinde oluşan yansıma hesaplanıp hibrit hücrelerde olduğu gibi simülasyona dahil edilmiştir. Fabrikasyon sırasında aşındırılacağından ön kontak için n+GaAs kontak katmanı (200 – 400 nm) kullanılmamış doğrudan düzgün ban durumunda ön kontak kullanılmıştır. Simülasyonu yapılan p-n eklem GaAs esnek ince film hücrenin J-V ve QE eğrileri Şekil 4.6’da sunulmuştur. Simülasyon sonucu %20,64 dönüşüm verimi, 1,12 V açık devre voltajı,  $20,63 \text{ mA/cm}^2$  kısa devre akımı ve %89,14 FF ve hesaplanmıştır. QE eğrisi davranışı ise doğrudan hücre yüzeyi yansımaları takip etmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, herhangi bir yansıtma önleyici katman/katmanlar kullanılmadan hibrit GaAs/ESC hücrelerin performansının p-n eklem hücreden daha iyi olduğu görülmektedir.

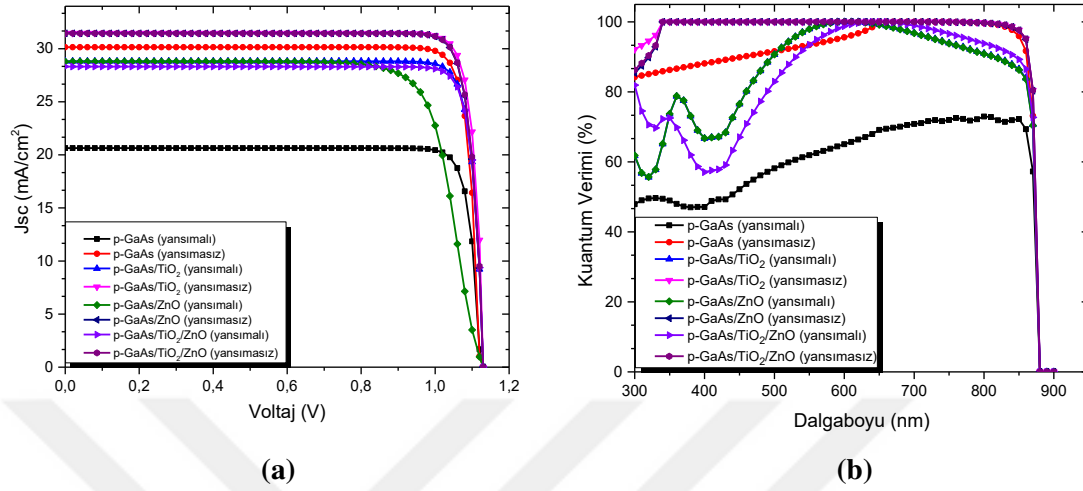


**Şekil 4.6.** p-n eklem esnek ince film GaAs güneş hücresi simülasyonu sonucu elde edilen; (a) J-V eğrisi (b) Kuantum verimi (QE) eğrisi.

Tüm hücre yapılarını yüzey yansıtmadan bağımsız hale getirmek ve çok iyi bir yansıtma önleyici katman etkisiyle hücrelerin erişebileceği limit değerlerini görmek için ve daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için hücre yüzeyinde yansıma olmadığı durum için de simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda zaman kazanmak amacıyla her bir hücre grubunun en iyi performans gösteren yapıları seçilmiştir.

Herhangi bir yüzey yansımalarının olmadığı durumda hücrelerin J-V ve QE eğrileri Şekil 4.7’de, hücrelerden elde edilen aygıt parametreleri ise Tablo 4.7’de karşılaştırmalı

olarak sunulmuştur. Ayrıca yansıma kayıplarını daha net olarak görmek için hücrelerin yüzey yansımalarını içeren değerleri de aynı şekil ve tabloda verilmiştir.



**Şekil 4.7.** GaAs/ESC hibrit esnek ince film hücreler ve p-n eklem GaAs esnek ince film hücrenin teorik simülasyondan elde edilen (a) J-V (b) Kuantum verimi (QE) eğrileri.

**Tablo 4.7.** GaAs/ESC hibrit esnek ince film hücreler ve p-n eklem GaAs esnek ince film hücrelerin performans parametrelerinin karşılaştırılması. (ilk gruptaki 4 hücrede ön yüzey yansıması hesaplara dahil edilmiş, son gruptaki 4 hücrede hücre yüzeyi yansımaları alınmıştır).

| Hücre                                                   | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Dönüşüm verimi (%) |
|---------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|--------------------|
| GaAs/ESC (TiO <sub>2</sub> )                            | 1,131               | 29,25                                 | 88,54  | 29,29              |
| GaAs/ESC (ZnO)                                          | 1,130               | 29,22                                 | 82,31  | 27,21              |
| GaAs/ESC (TiO <sub>2</sub> /ZnO)                        | 1,130               | 28,65                                 | 88,85  | 28,77              |
| p-n eklem GaAs                                          | 1,122               | 20,62                                 | 89,14  | 20,64              |
| GaAs/ESC (TiO <sub>2</sub> )<br>(Yüzey yansımaları)     | 1,132               | 31,46                                 | 88,95  | 31,69              |
| GaAs/ESC (ZnO)<br>(Yüzey yansımaları)                   | 1,133               | 31,45                                 | 88,22  | 31,44              |
| GaAs/ESC (TiO <sub>2</sub> /ZnO)<br>(Yüzey yansımaları) | 1,133               | 31,45                                 | 88,28  | 31,46              |
| p-n eklem GaAs<br>(Yüzey yansımaları)                   | 1,121               | 30,14                                 | 88,84  | 30,02              |

QE eğrisinden de görüldüğü üzere GaAs/ESC hücreler spektrumun yüksek enerjili bölgesini, p-n eklem referans hücreye göre etkin bir şekilde kullanabilmektedir. Bu durum artan kısa devre akınında kendini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla yüksek bant aralıklı geçiş metal oksit ESC yaklaşımı GaAs tabanlı hücrelerde verimlilik arttırmak için yüksek potansiyel vaat etmektedir. Tabloya bakıldığında GaAs/ESC hibrit hücreler yansıma önleyici katman olmadan bile neredeyse p-n eklem hücrenin yüzey yansımasız verimlilik değerine ulaşabilmektedir. Dolayısıyla TCO malzemedeki yapılacak iyi bir tasarımla hibrit hücrelerde yansıtma önleyici katman kullanımı bile olmadan yaklaşık %7,5 olan kayıp engellenebilirse, ayrıca yansıtma önleyici katmana ihtiyaç duymadan üretim maliyetinin daha da aşağıya çekilebilme potansiyeli vardır. Hücre ön yüzeyinden malzeme türü ve kalınlık farkına göre oluşan yansıma farkıyla alakalı farklı performans davranışı tüm hücre yüzeylerinde yansıma yokken hesaplandığında hem tek katman hem de çift katman hibrit hücrelerde hemen hemen aynı yüksek verimlilik değerlerine ulaşılabilirdiğini göstermektedir. Bu da hücre üretimi açısından malzeme üretimi, mühendisliği ve maliyette büyük bir esneklik sağlayabilecektir. Tez başlangıcında öngördüğümüz GaAs tabanlı esnek ince film hücrelerde metal oksit ESC kullanımının geleneksel p-n eklem hücreden daha iyi performans gösterebileceği yapılan simülasyonlarla desteklenmiştir.

## 5. GÜNEŞ HÜCRESİ FABRİKASYON VE KARAKTERİZASYONU

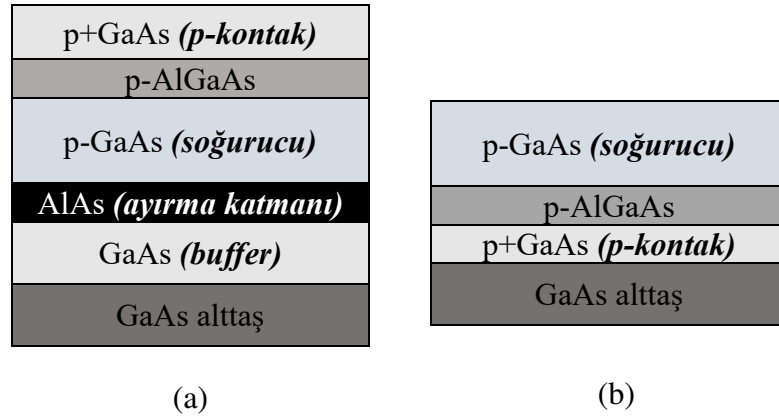
Bu bölüm, tezde kullanılan deneysel teknik ve yöntemlere genel bir bakış sunmaktadır. Hücre üretim, fabrikasyon ve karakterizasyon yöntemleri gereksiz aşırı teknik detaylara girmeden anlatılmaktadır.

### 5.1. Aygıt Üretim ve Fabrikasyon Süreçleri

GaAs tabanlı esnek ince film güneş hücresi için takip edilen üretim süreci; MBE yöntemiyle GaAs yarı güneş hücresi yapısının büyütülmesi, arka kontak metali kaplama, esnek taşıyıcıya filmin aktarılması, kenar izolasyonu, elektron seçici katman kaplama, TCO ve ızgara ön kontağın kaplanması şeklinde sıralı adımları takip etmektedir.

#### 5.1.1. Alttaş hazırlama

Bu tez kapsamında GaAs tabanlı yarı hücre yapılar, Veeco Gen20MC katı kaynak moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi ile 3-inç çaplı (100) p-tipi ve 4 inç yarı yalıtkan (SI) GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Tasarlanan ELO ve alttaş tabanlı yarı hücrelerin epitaksiyel büyütme şeması Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 5.1.** GaAs yarı hücrelerin epitaksiyel büyütme yapıları a) Esnek ince film ELO hücre yapısı b) Alttaş tabanlı hücre yapısı.

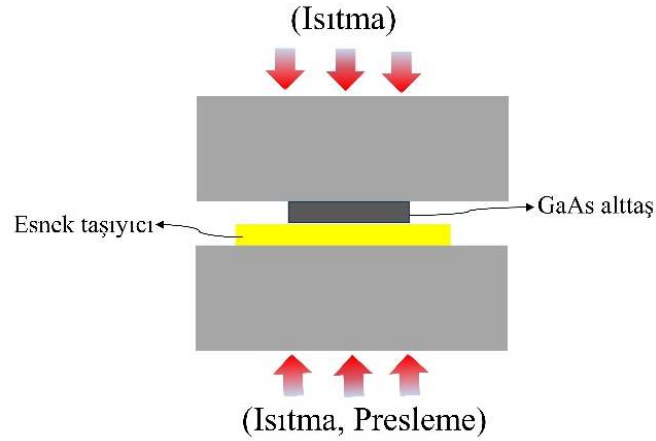
Yarı hücre yapıları büyütüldükten sonra hücrelerin (hem ELO hem de alttaş tabanlı) arka kontak metalizasyonu yapılmaktadır. Metalizasyon öncesi örnek yüzeylerinin kimyasal temizliği ve oksit kaldırma işlemleri gerekmektedir. Bu süreçte sırasıyla şu temizleme adımları uygulanmıştır: a) 3 dakika asetonla temizleme; b) 3 dakika izopropanol içinde temizleme; c) de-iyonize su ile durulama ve azot ortamında kurutma.

Temizlenen örnek yüzeyindeki oksiti kaldırmak için alttaş HCl:H<sub>2</sub>O (1:5 oranında) içerisinde 30 sn. bekletilerek de-iyonize su ile durulanmış, ardından azot ortamında kurutulmuştur.

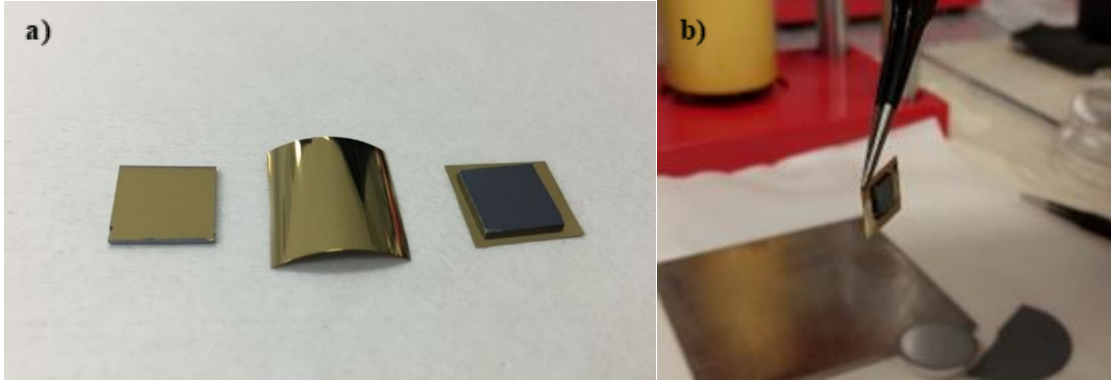
Hücre yapılarının Ohmik kontak metalizasyonu için Pt (20 nm)/Au (180 nm) saçtırma ve termal buharlaştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Esnek ince film hücre yapılarının ELO yöntemiyle transfer edileceği polyimid taşıyıcılarda aynı yöntemle aynı şekilde kaplanmış ancak Au kalınlığı 360 nm yapılmıştır.

### 5.1.2. Epitaksiyel film kaldırma (ELO)

Arka kontak metalizasyonu yapılan esnek ince film hücre yapılarını üzerine büyütüldüğü alttaştan 50 µm kalınlığındaki polyamid esnek taşıyıcıya nakletmek için ELO işlemi uygulanmıştır. İşlem öncesinde alttaş 10x10 mm<sup>2</sup>, 8x8 mm<sup>2</sup> ve 6x6 mm<sup>2</sup> farklı büyüklüklerde kesilmiştir. Kesilen alttaşlar metal-metal füzyonu yöntemiyle (Şekil 5.2) yaklaşık 185 °C sıcaklık ve 8 bar basınç altında 4-5 dk. sürede polyamid taşıyıcıya yapıştırılmıştır. Görsel 5.1’de örnek ve polyamidin yapıştırılmadan önce ve birbirine yapıştırıldıktan sonraki resimleri sunulmuştur.

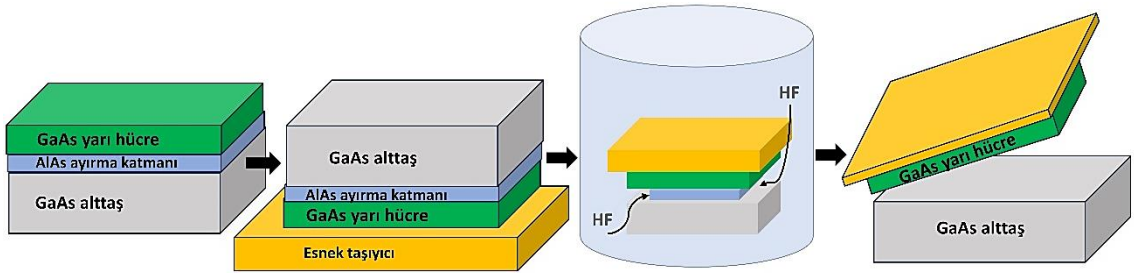


**Şekil 5.2.** Alttaş ve esnek taşıyıcıyı metal bağla yapıştırma prosesi

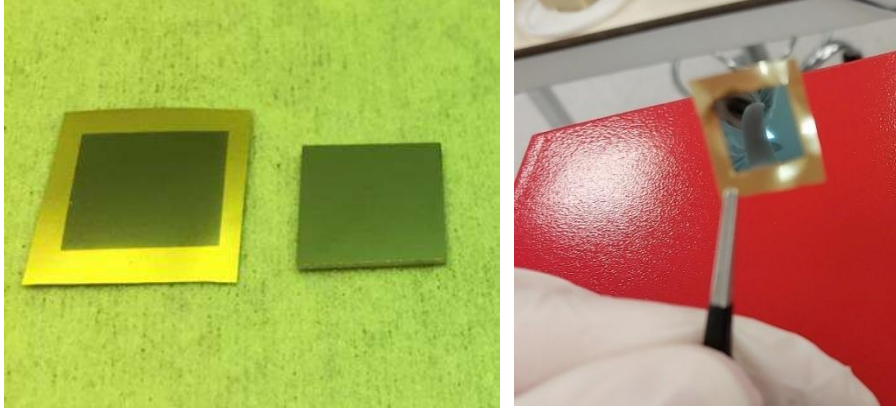


**Görsel 5.1.** Yarı hücre yapısı bulunan örneğin polyamide yapıştırma sürecinden görüntüler : (a) alttaş (sol), polyamid (orta) ve örneğin polyamide yapıştırılmış hali (a-sol ve b).

Örnekler polyamid taşıyıcıya yapıştırıldıktan sonra yarı aktif hücre yapısını alttaştan kaldırıp polyamide aktarmak için ELO işlemine tabii tutulmuşlardır. ELO süreci için örnekler HF:Aseton (1:1) çözeltisine bırakılmış, serbest bırakma katmanının aşınmasından sonra yarı hücre yapısı alttaş üzerinden polyamid taşıyıcıya aktarılmıştır. ELO sürecinin takip edilen adımları şematik olarak Şekil 5.2’de gösterilmiştir. ELO süreci sonrası kimyasal olarak temizlenip, durulanan ve kurutulan örnek ve geride kalan üzerine büyütüldüğü GaAs alttaş Görsel 5.2’de gözükmemektedir. Epitaksiyel olarak ters büyütülen hücre yapısı ELO süreci sonunda normal hale getirilmiştir.



**Şekil 5.3.** ELO yönteminin şematik gösterimi.



**Görsel 5.2.** *ELO süreci ile polyamide aktarılan yarı hücre yapısı: polyamide aktarılan esnek ince film (sol) ve geride kalan üzerinden kaldırıldığı GaAs alttaş (10x10 mm<sup>2</sup>), polyamide aktarılan esnek ince filmin ayna görüntüsü (sağ).*

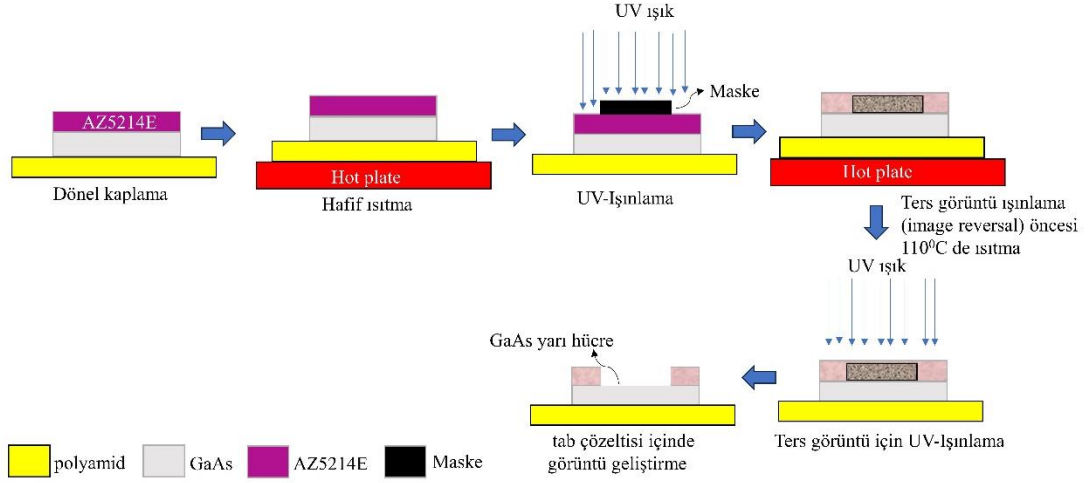
### 5.1.3. Fotolitografi

Fotolitografik süreçler polyamid taşıyıcıya aktarılan yarı hücre yapısı üzerine kaplanacak ESC katman/katmanların ve TCO katmanının alan tanımlaması ve TCO üzerine kaplanacak ön ızgara kontağın tanımlanması için kullanılmıştır. Her bir fotolitografik süreç aşağıda detaylandırılmıştır.

#### ***ESC ve TCO için litografi süreci:***

Polyamide aktarılmış yarı GaAs hücre yapısı üzerine ESC ve TCO katmanların kaplama sürecinde bu katmanların hücre arka kontağına da kaplanıp kısa devre oluşturmasını engellemek gerekmektedir. Bunun için fotolitografi yöntemiyle alanı polyamide aktarılan GaAs ince filmde daha küçük olacak şekilde film üzerinde ESC ve TCO kaplanacak bölgenin alan tanımlaması yapılmıştır. Bu katmanların kaplanacağı litografik alan tanımlama sürecinin adımları Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Litografik süreçte fotorezist olarak AZ5214E kullanılmıştır. ESC ve TCO kaplanacak alanın tanımı için uygun geometri positif fotorezist yaklaşımıyla esnek ince film yarı hücre yapısı üzerine maske hizalayıcı ve UV pozlama ile desenlenmiştir. Pozlama öncesi film üzerine dönel kaplayıcı ile kaplanan fotorezist 95-98 °C sıcaklıkta sıcak tabla (hot plate) 1 dk. ısıtılma tabi tutulmuştur. UV pozlama sonrası örnekler tekrar 110 °C sıcaklıkta, 2 dk. süreyle sıcak tabla üzerinde ısıtılmıştır. AZ5214E fotorezistin “image reversal” işlemine uygunluğundan dolayı örnekler maske kullanılmadan tüm yüzeyine tekrar maske hizalayıcıda UV pozlama yapılmıştır. İkinci pozlama sonrası örnekler AZ400K geliştirici çözeltisi (1:4 AZ400K:H<sub>2</sub>O) içerisinde ~45 sn geliştirilerek ESC ve TCO kaplanacak alan

film yüzeyine desenlenmiştir. Böylelikle metal oksit kaplanması istenilen GaAs film yüzeyi açık kalmış, Au kaplı polyamid ve film kenarında ince bir şerit fotorezistle kaplanmıştır. Litografi adımı tamamlandıktan sonra ESC ve TCO katmanın kaplanması aşamasına geçilmiştir.

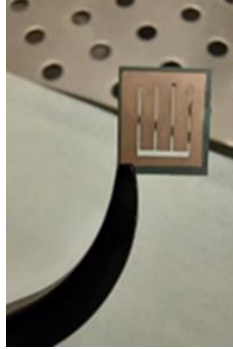


**Şekil 5.4.** GaAs yarı hücre yapısı üzerine kaplanacak ESC ve TCO katman alanının litografik yöntemle tanımlama süreci.

#### **Ön ızgara kontak metali için fotolitografi süreci:**

Ön ızgara metal kontak desenlemesi için Görsel 5.3'teki Si gölge maske (shadow mask) litografik maske olarak kullanılıp ızgara kontak deseni hücre üzerine aktarılmıştır. Bunun için AZ9260 fotorezisti dönel kaplayıcıda hücrenin TCO katmanı üzerine kaplanmış, sonra 1 dk. süre boyunca 110 °C sıcaklıkta sıcak tabla (hot plate) üzerinde hafif ısıtma yapılmıştır. Isıl işlemten sonra maske hizalayıcıda 150 sn. süre ile maske deseni film üzerine pozlanmıştır. AZ400K:H<sub>2</sub>O (1:4) geliştirici çözeltisi içerisinde maske deseni film üzerine aktarılmıştır. Hücrelere ön ızgara Ohmik metal kontak olarak 300 nm

Ag termal buharlaştırma ile kaplanmış, metal kaldırma (lift-off) işlemiyle ızgara kontak metalizasyonu oluşturma süreci tamamlanmıştır.



**Görsel 5.3.** Ön ızgara kontak metalizasyonu için fotolitografik maske olarak kullanılan Si gölge maske (shadow maske)

#### 5.1.4. ESC ve TCO katmanların kaplanma süreçleri:

Magnetron saçtırma, ince filmlerin biriktirilmesi için Fiziksel Buhar Biriktirmede (PVD) en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Basitçe, hedef malzemenin momentum transferi yoluyla yüzey atomlarını fırlatmak için enerjik iyonlarla bombardıman edilmesine dayanmaktadır. Bu iyon bombardımanı, DC veya RF voltajının uygulanması nedeniyle negatif taraflı olan hedef malzemeyi bombalamak için elektronsuz bir bölge boyunca bir plazmadan pozitif iyonların hızlandırılmasını içermektedir [92]. Hedeften fırlatılan atomlar daha sonra alt tabaka üzerinde birikmekte ve filmlere dönüşmektedir. Metaller, alaşımlar ve yalıtkanlar gibi çeşitli malzemeler, bu yöntem kullanılarak ince film olarak biriktirilebilmektedir.

ESC ve TCO malzemelerin desenlenmiş yarı GaAs hücre yapıları üzerine kaplanma işlemi RF magnetron saçtırma (sputter) tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. 2 inç çapında hedeflerin kullanıldığı magnetron örnek yüzeyine yandan yaklaşık 10 cm mesafeden belli bir açı ile (yaklaşık 45°) bakmaktadır. Kaplama öncesi sistemin taban basıncı  $10^{-7}$  Torr lar seviyesine kadar indirilmiştir. Sistemde reaktif ve reaktif olmayan saçtırma işlemleri için  $O_2$ ,  $N_2$  ve Ar gazları istenilen oranda kullanılabilir. Kaplama sırasında sistem kazanç basıncı değişken kapı vana ile  $4 \times 10^{-3}$  -  $4 \times 10^{-3}$  Torr seviyelerinde tutulmuştur. Kullanılan sistemde alttaş ısıtılmadığından tüm kaplamalar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. ESC ve TCO malzemelerin saçtırma parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** RF magnetron saçtırma yöntemi ile kaplama parametreleri

| Parametre                | TiO <sub>2</sub>     | ZnO                  | ITO                  |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Başlangıç basıncı (Torr) | 4x10 <sup>-7</sup>   | 4x10 <sup>-7</sup>   | 4x10 <sup>-7</sup>   |
| Proses basıncı (Torr)    | 4,8x10 <sup>-3</sup> | 4,6x10 <sup>-3</sup> | 4,5x10 <sup>-3</sup> |
| RF gücü (W)              | 60-80                | 50                   | 70                   |
| Argon akış hızı (sccm)   | 130                  | 130                  | 130                  |
| Kaplama hızı (Å/s)       | 0,2                  | 0,2                  | 0,2                  |

### 5.1.5. Elektron demet ışıını ve termal buharlaştırma

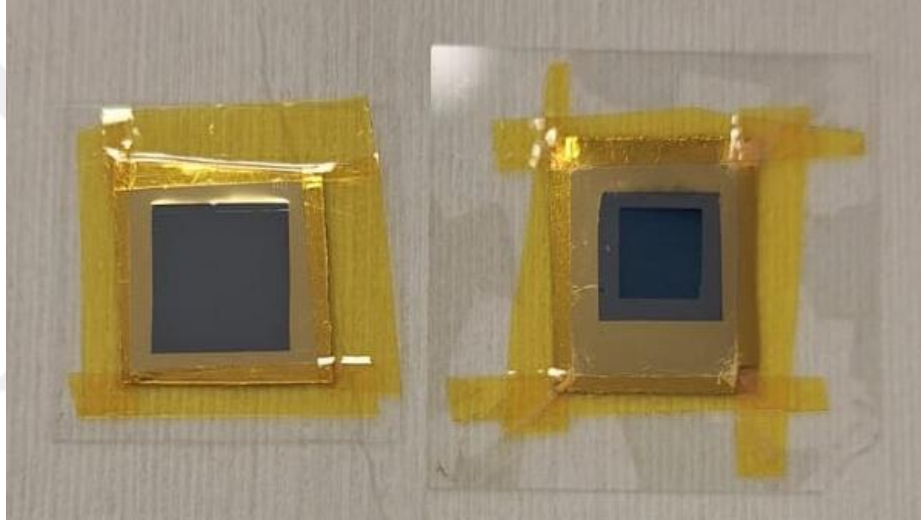
Elektron demet (ya da e-demet) buharlaştırma, malzemenin yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılarak buharlaştırıldığı bir tür fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Buharlaşan hedef malzeme, malzemenin koyulduğu potaya kıyasla nispeten düşük bir sıcaklıkta tutulan alt tabaka üzerinde yoğunlaşarak biriktirilmesine dayanmaktadır [93]. Elektron demeti, 10<sup>-6</sup>-10<sup>-7</sup> Torr vakum seviyesinde tutulan bir haznedeki bir tungsten filamana birkaç kilovoltluk yüksek bir voltaj uygulanarak üretilir. E-demet buharlaştırma, elektron enerjisinin malzemeye doğrudan aktarılmasını sağlar ve bu nedenle yüksek erime noktasına sahip metalleri buharlaştırmak ve biriktirmek için kullanılmaktadır [93]. Tungsten filamana voltaj uygulanarak oluşturulan e-demeti daha sonra yönlü bir manyetik alan yardımıyla metal potaya doğru yönlendirilir. Metal potadan saçılan hedef materyal haznede bulunan örnek tutucudaki örneklerle yapışır, böylelikle örnekler üzerine hedef malzeme kaplanır.

ITO'nun görünür bölgede yüksek geçirgenlikte olması ve yüksek iletkenlik özellikleri nedeniyle güneş hücresi yapısında TCO olarak kullanılmaktadır. ITO malzeme TCO performansı açısından değerlendirebilmek için saçtırma metoduyla kaplamanın yanında ayrıca e-demet buharlaştırma yöntemi ile de kaplanmıştır. Ayrıca hücre kontak metalleri olan Au ve Ag'de e-demet sisteminde kaplanmıştır.

### 5.1.6. Kenar aşındırma

Filmlerin üzerine ESC ve TCO katmanlar kaplandıktan sonra kaplanan alanın dışında ince bir şerit olarak kaplanmamış olarak kalan GaAs tabanlı katmanların arka kontağa kadar aşındırılarak aktif hücre yapısının izolasyonu gereklidir. Böylece ELO sürecinde GaAs film kenarlarında oluşabilecek mikro çatlaklarda ayrıca giderilmiş olmaktadır. Bu işlem için, ELO filmler üzerine fotorezist (AZ9260) dönel kaplayıcı (spin

coater) cihazında kaplandıktan sonra 110 °C de 1 dk. hafif ısıtma yapılmıştır. Kenar izolasyonu için kullanılan desen maske hizalayıcı ile, 160 sn. sürede UV ışık altında pozlanmıştır. Pozlanan örnek geliştirme 180 s geliştirme çözeltisinde tutulduktan sonra durularak kurutulmuş ve sonrasında kalan fotorezistin asit dayanımını arttırmak için 120 °C de 5 dk. sıcak tablada ısıtılmıştır. Sonrasında saçtırma işlemlerin de kaplanmamış olarak kalan ince GaAs şerit arka kontağa kadar  $C_6H_8O_7$ (sitrik asit): $H_2O$ : $H_2O_2$  çözeltisi (5:5:1) kullanılarak aşındırılmıştır. Bu aşındırma sonrası 10x10 mm<sup>2</sup> şeklinde polyamide tansfer edilen GaAs film 8x7,5 mm<sup>2</sup> alana kadar küçültülmüş ve bu küçültülen alan GaAs/ESC hibrit hücrelerin toplam alanı haline gelmiştir (Görsel 5.4).



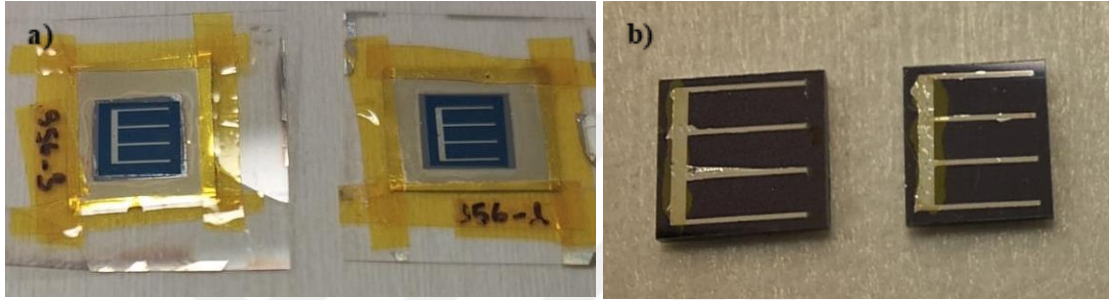
**Görsel 5.4.** ESC ve TCO kaplı esnek ince film hibrit hücre yapısı: kenar izolasyonu öncesi (sol), kenar izolasyonu sonrası (sağ).

#### 5.1.7. Termal Tavlama

Hızlı Termal İşlem veya Hızlı Termal Tavlama (RTP/RTA), maksimum birkaç dakikalık bir zaman ölçeğinde kısa süreli ısı işlemler gerçekleştirmek için kullanılan bir yöntemdir. RTP başlangıçta iyon implant tavlama için geliştirilmiştir, ancak uygulamasını oksidasyon, kimyasal buhar biriktirme ve özellikleri, kafes arayüzünü veya stres gevşemesini geliştirmek için elementlerin, bileşiklerin veya alaşımların kristalografik yapısını değiştirmek gibi gelişmiş uygulamalara genişletmiştir. Çalışma kapsamında RTP süreci, kaplanan ESC ve TCO katmanların yapısal, elektriksel, optik geçirgenlik özelliklerini ve ön ızgara kontakların Ohmik davranışını iyileştirmek için kullanılmıştır. RTP’de tavlama süreci:

- Alttas tabanlı GaAs/ESC güneş hücreleri, 350 °C sıcaklıkta formik gaz (%3 H<sub>2</sub>, %97 N<sub>2</sub>) ortamında 10 dk.
- ELO tabanlı GaAs/ESC güneş hücreleri, 325 °C sıcaklıkta formik gaz (%3 H<sub>2</sub>, %97 N<sub>2</sub>) ortamında 10 dk.

Metal üst kontak kaplama ve RTP’de tavlama sonrasında, Görsel 5.5’teki fotoğrafta görüldüğü gibi GaAs/ESC ELO ve alttas tabanlı hibrit hücrelerin filmlerin fabrikasyonu tamamlanmıştır.



**Görsel 5.5.** Fabrikasyonu tamamlanan GaAs/ESC güneş hücreleri (a) ELO tabanlı (b) Alttas tabanlı

## 5.2. Aygıt Karakterizasyonu

Hücre fabrikasyon süreci tamamlandıktan sonra performans değerlerini ölçmek ve aygıt parametrelerini belirlemek için Güneş simülatörü altında standart koşullarda I-V ve yine standartlara uygun kuantum verimlilik ölçüm sistemiyle QE eğrilerini elde etmek için ölçümler gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1. Akım-Voltaj Ölçümleri

Güneş hücrelerinin fotoelektrik dönüşüm performansını belirlemek ve değerlendirmek için 25 °C hücre sıcaklığı ve standart güneş ışığı koşullarında AM1.5G ışımasında Güneş simülatörüyle (ABET-2000) I-V davranışları ölçülmüştür ve hücrelerin verimlilik, I<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub>, FF, paralel (shunt) direnç (R<sub>sh</sub>) ve seri direnç (R<sub>s</sub>) gibi fiziksel parametreleri bu eğriler üzerinden hesaplanmıştır.

Güneş hücresi performansını belirleyen parametrelerden; I<sub>sc</sub> ve V<sub>oc</sub>, sırasıyla güneş hücresinden gelen maksimum akım ve potansiyel farktır. FF ise hücreden elde edilen maksimum gücün ( $P_{\text{mak}} = V_{\text{mak}} \times I_{\text{mak}}$ ) teorik limitte elde edilebilecek maksimum güce ( $J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}}$ ) oranıdır.

$$FF = \frac{P_{mak}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5.1)$$

Bir güneş hücresi için ışığın elektrik enerjisine dönüşüm verimliliği,  $\eta$ , şu şekilde verilir

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P} \quad (5.2)$$

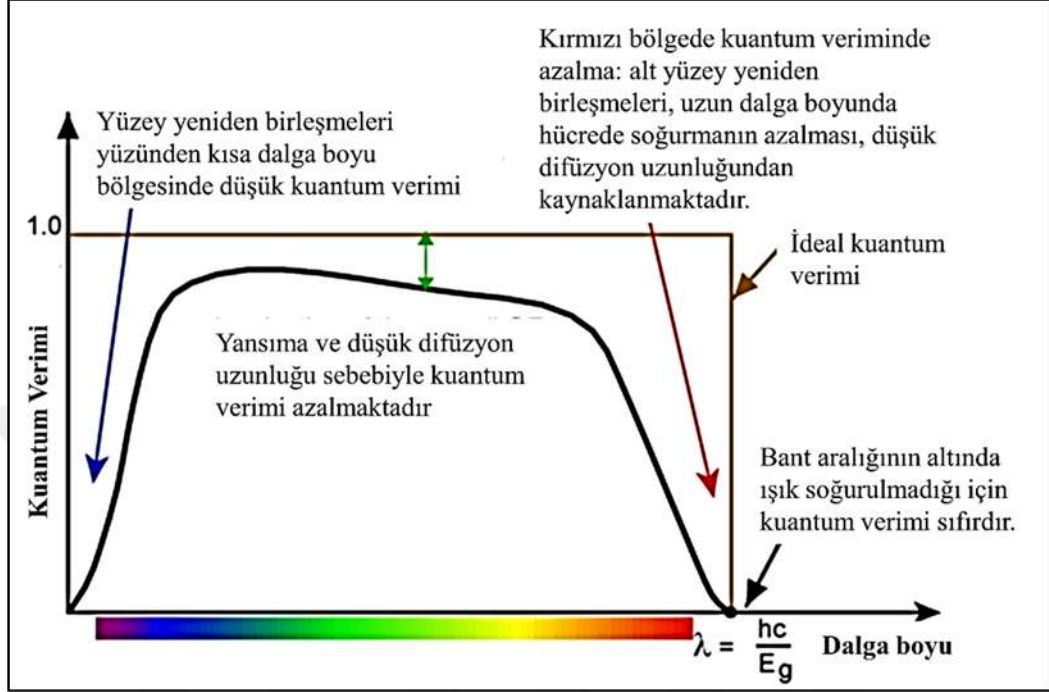
Burada  $J_{sc}$  kısa devre akımı ve  $P$ ,  $100 \text{ mW/cm}^2$  değerinde gelen ışığın gücüdür.

Paralel ve seri direnç I-V eğrilerinden şu formüller ile hesaplanmaktadır:  $R_{sh}=dV/dI$ 'nin  $V=0$ 'daki değeri ve  $R_s=dV/dI$ 'nin  $I=0$ 'daki değeri olarak alınır [94]. Güneş hücreleri için seri direncin mümkün olduğunca düşük ve paralel direncin ise mümkün olduğunca yüksek olması gerekmektedir. Bu koşullar hücrenin verimini ideallığe yaklaştırmaktadır.

### 5.2.2. Kuantum verim ölçümleri

Güneş hücresinin enerji dönüşümü ile ilgili soğurma ve yük toplama özelliklerini belirlemek için kullanılan bir yöntem, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak monokromatik ışık altında kısa devre akımını ölçmek ve gelen foton akısı ile ilişkili teorik akıma bölmektir. Bu yöntem fotonlar tarafından taşınan toplam enerjinin yüzde kaçının elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini göstermektedir. Güneş hücresi tarafından toplanan taşıyıcı sayısının hücreye gelen belirli bir enerjideki foton sayısına oranı olan kuantum verimliliği ile ölçülmektedir. Belirli bir dalga boyundaki tüm fotonlar soğurulursa ve ortaya çıkan azınlık taşıyıcıları toplanırsa, bu durumda o dalga boyundaki kuantum verimliliği 1 ya da %100 olmaktadır, ki bu ideal olan kuantum verimidir. Güneş hücresinin dalga boyuna göre dış kuantum verimi eğrisi ve kuantum veriminde oluşan kayıpların nedenleri Şekil 5.5'teki grafikte gösterilmektedir. Bu grafiğin analizi, cihazın

hangi dalga boylarında daha verimli çalıştığını ve hangi dalga boylarında iyileştirme gerektirdiğini belirlemeye yardımcı olmaktadır.



Şekil 5.5. Gelen ışığın dalga boyuna bağlı güneş hücrelerinde dış kuantum verimi grafiği ve kuantum veriminde meydana gelen kayıpların gösterimi [6].

Kuantum verimliliği ideal olarak yukarıda gösterilen kare şekline sahip olsa da çoğu güneş hücresinin kuantum verimi taşıyıcıların yeniden birleşmesi nedeniyle azalmaktadır. Toplama olasılığını etkileyen aynı mekanizmalar kuantum verimliliğini de etkiler. Örneğin, ön yüzeyin pasifleştirilmesi yüzeye yakın olarak üretilen taşıyıcıları etkiler ve mavi ışık yüzeye çok yakın bir yerde soğurulduğu için, yüksek ön yüzey yeniden birleşmesi kuantum verimliliğinin mavi kısmını etkilemektedir. Benzer şekilde, yeşil ışık bir güneş hücresinin büyük kısmı tarafından soğurulur ve düşük bir difüzyon uzunluğu, güneş hücresi kütlesinden toplama olasılığını etkileyerek, spektrumun yeşil kısmındaki kuantum verimliliğini azaltmaktadır. Düşük kuantum verim bölgeleri, malzeme kusurları veya aygıt tasarım eksiklikleri gibi sorunların tespit edilmesine yardımcı olabilmektedir.

Dahili kuantum verimlilik (IQE) yalnızca gelen fotonlar nedeniyle dahili olarak üretilen yük taşıyıcılarının sayısı için hesaplanmaktadır. Bu nedenle bir güneş hücresinin IQE'si her zaman EQE'sinden daha yüksektir. EQE hesaplamasından önce, bir güneş hücresinin spektral tepkisinin bilinmesi gerekmektedir. Spektral tepki (SR), hücre

tarafından üretilen akım ile gelen güç arasındaki orandır. Bu denklemler SR, EQE ve IQE arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$SR = \frac{I_{sc}(\lambda)}{p(\lambda)} \quad (5.3)$$

$$EQE = SR \left( \frac{1}{q} \cdot \frac{hc}{\lambda} \right) \quad (5.4)$$

$$IQE = \frac{EQE}{1-R} \quad (5.5)$$

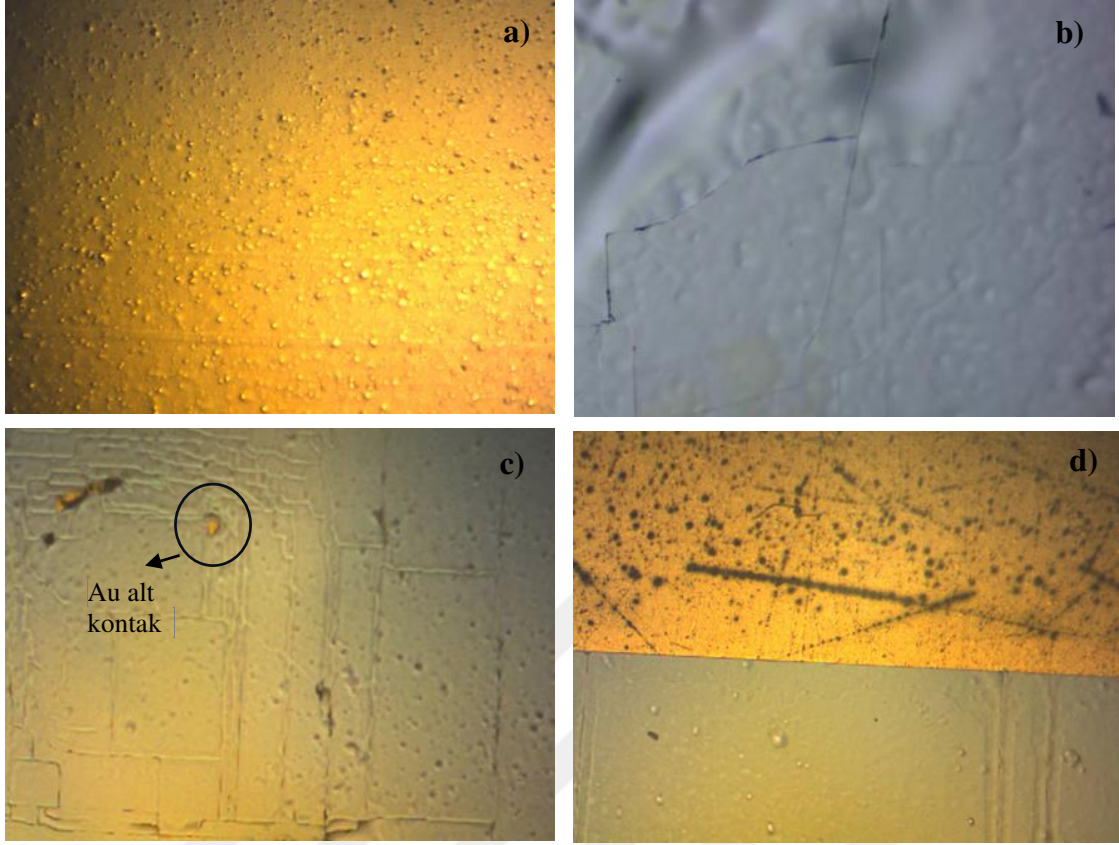
Yukarıdaki denklemlerde R yansıma,  $I_{sc}$  kısa devre akımı,  $p$  giren ışığın gücü,  $\lambda$  dalga boyu,  $q$  elektron yükü,  $h$  Planck sabiti ve  $c$  ışık hızı sabitidir.

Dış kuantum verimliliği (EQE) ölçümleri, Xenon lamba altında, ölçülecek örneğin konulduğu x-y-z yönlü hareket edebilir düzenek (stage) ve metal kontaklara temas ettirilen iki adet probtan oluşan Oriel Quantx-300 marka monokrometre cihazında 330-950 nm dalgaboyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

## 6. BULGU VE TARTIŞMA

ELO esnek ince film hücrelerin fabrikasyon süreci, yüzeyleri metal kaplı örnek ve plastiğin yapıştırılması (metalik bağ kurarak) yöntemi sonrası ELO süreciyle alttaştan kaldırılıp aktarılması ile başlamıştır. Ancak hücre fabrikasyonu sırasında hücre yapısında muhtemelen olası dislokasyonlardan dolayı mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca fotovoltaiik endüstrisi için özel geliştirmiş olan polyamid yüzeyinde girinti-çıkıntı şeklinde pürüzlülük olduğu görülmüştür (Görsel 6.1a). Özellikle yaklaşık 1 µm yüksekliğe kadar çıkabilen bu çıkıntılar örneklerin polyamide yapıştırılması ve film transferi sırasında arka metal kontak katmanı dahil en fazla 2 µm kalınlığında olan hücre yapısını ya delmekte ya da çeşitli mikro çatlamalara sebep olabilmektedir (Görsel 6.1b-c). Bunun sonucunda fabrikasyonun ilerleyen süreçlerinde hücrelerin kısa devre oluşumlarına yol açabilmektedir. Bu durum ya aygıt fabrikasyon süreci sonunda hücrelerde doğrudan kısa devre olarak gözlenmiş ya da ölçümler sırasında hücreler kararsız davranabilmiştir. Fabrikasyonu tamamlanan birçok hücreden çeşitli şekillerde kısa devre olmasından dolayı ölçüm alınamamış olsa da yeterli sayıda hücrenin I-V ve QE ölçümleri başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

Polyamid taşıyıcı yüzeyindeki pürüzlülük yüksek grid elmas zımpara ve alümina nano-top içeren parlatma solüsyonu ile giderilmeye çalışılmış ancak istenilen yüzey kalitesine ulaşılammıştır (Görsel 6.1d). Çıkıntıların tepe sivrililiğini ve filme uygulayacağı basıncı azaltabilmek için polyamid üzerine Au katmanı öncesi 500 nm civarı kalınlıkta Ag katman kaplanmış pürüzlülüğün hücre yapısına olan etkisi belirli ölçüde engellenmiştir.

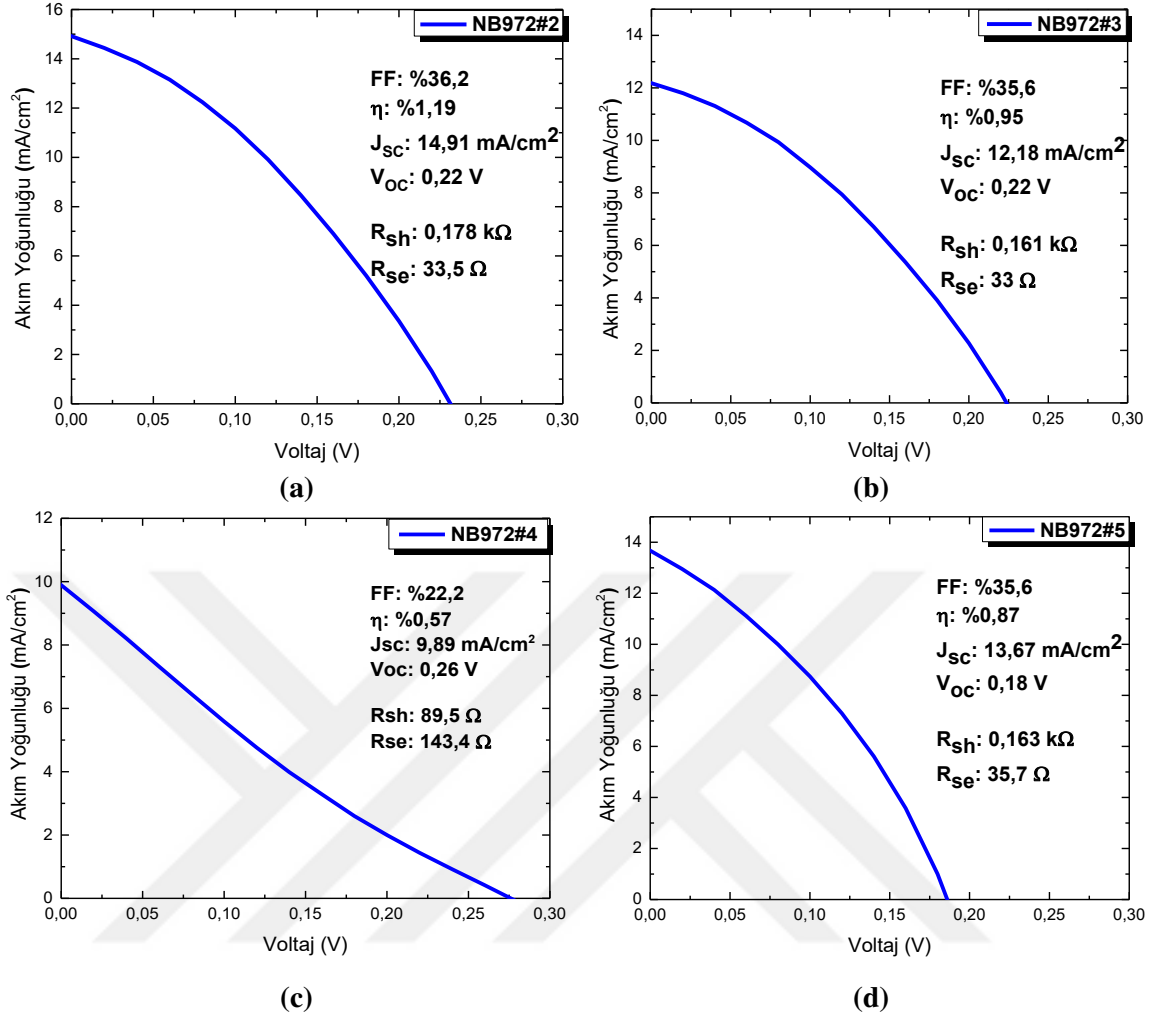


**Görsel 6.1.** (a) üzerinde girinti-çıkıntı olan Au kaplı polyamid (b-d) polyamid ve üzerine nakledilen ELO GaAs yarı hücre film.

Hücre fabrikasyon süreçlerinde MBE’de epitaksiyel olarak büyütülen yarı GaAs hücre yapıları içeren örneklerden NB860 kodlu alttaş ELO süreçlerinin geliştirilmesi, ESC ve TCO katmanların optimizasyonu (ısıtıl işlem, elektriksel, yapısal vb.) işlemlerinde kullanılmıştır. NB928 ve NB956 kodlu alttaşlar ELO tabanlı hibrit hücrelerin, NB972 kodlu alttaş ise alttaş tabanlı hibrit hücrelerin fabrikasyonunda kullanılmıştır. Alttaş tabanlı hücreler ELO hücrelerin değerlendirilmesinde özellikle polyamid kaynaklı veya fabrikasyon süreci kaynaklı etkilerin anlaşılabilmesi için kullanılmıştır. Fabrikasyonu yapılan hücrelerin karakterizasyon sonuçları aşağıda her bir hücre tipi için ayrı başlıklar altında sunulmuştur. Hücrelerin Güneş simülatörü altında yapılan I-V ölçümlerinde alan tanımı olarak aktif alan kullanılmıştır (ızgara kontak alanı dahil edilmemiştir).

### 6.1. TiO<sub>2</sub> Katmanlı GaAs Güneş Hücresi

ESC olarak 7,5 nm ve 10 nm TiO<sub>2</sub> katman içeren alttaş tabanlı kontrol GaAs güneş hücrelerin dört tanesinin güneş simülatörü altında ölçülen I-V eğrileri Şekil 6.1’de verilmiştir. Tablo 6.1’de ise bu hücreler ve I-V eğrisi konulmamış diğer hücrelin hücre parametreleri sunulmuştur. I-V eğrileri ve tabloda verilen değerler incelendiğinde, aynı yapıda aynı fabrikasyon sürecinden geçmiş hücrelerin performansları arasında oldukça büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu hücrelerden ölçülebilmiş en yüksek verimlilik değeri 7,5 nm TiO<sub>2</sub> ESC’li hücrelerde %1,19, 10 nm TiO<sub>2</sub> olan hücrelerde ise %0,87 dir. Elde edilen verimlilik değeri simülasyon verileriyle karşılaştırıldığında çok düşük durmaktadır. Genel olarak verimlilik haricinde hücre bulguları incelendiğinde hücre parametreleri olan  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$  ve FF değerlerinin çok düşük olduğu gözükmemektedir. Ayrıca homojen olmayan şekilde hücreler de yüksek seri direnç ve düşük paralel direnç etkisi açıkça gözükmemektedir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının değişiminin hücrelerin  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$  FF değerleri üzerinde herhangi bir etkisi görülememiştir. Elde edilen sonuçlar hem ESC malzemenin ve hem de TCO malzemenin istenilen iletkenli seviyelerine ulaşamadığını göstermektedir. Ayrıca ESC katmanın saçtırma yöntemiyle kaplanması GaAs yüzeyini bozarak GaAs/ESC arayüzeyinde beklenin çok ötesinde kusur oluşturduğu tahmin edilmektedir. Öte yandan her ne kadar teorik hesaplamalarda çok uygun enerji bant hizalanmaları gösterebilir de uygulanan kaplama yöntemi ve sürecinde elde edilen ESC ve TCO malzemenin gerçek enerji bant hizalanmasının beklendiği şekilde oluşmaması ihtimali de çok yüksektir. Teorik olarak 1 V’un üzerinde olan  $V_{OC}$  değerinin maksimum 0,26 V civarında olması ve çok düşük akım değerleri bu öngörülerini destekler niteliktedir. GaAs ESC arayüzü ve ESC katmanının kendisinde büyük yoğunlukta var olduğunu kabul ettiğimiz kusurlar üretilen taşıyıcıların önemli ölçüde kaybedilmesine hem akım hem de voltaj düşüklüğü ve homojen olmayan hücre davranışlarına sebep olabilmektedir. Hücrelerde oluşan yüksek seri direnç etkisi hem TiO<sub>2</sub> hem de ITO malzemelerin olması gereken n-tipi katkı yoğunluklarına ulaşamadıklarını göstermektedir. Aynı anda gözlenen düşük paralel direnç değerleri de ya TiO<sub>2</sub> katmanda mikron seviyelerinde delik (pin hole) olduğu veya yüksek kusurlu TiO<sub>2</sub> ten dolayı üst kontağın kusurlar üzerinden soğurucu bölgeyle etkileşime geçtiğini işaret etmektedir. Dolayısıyla bu iki direnç etkisi de diğer hücre parametrelerini düşürerek yüksek verimlilik kayıplarına sebebiyet vermiştir.

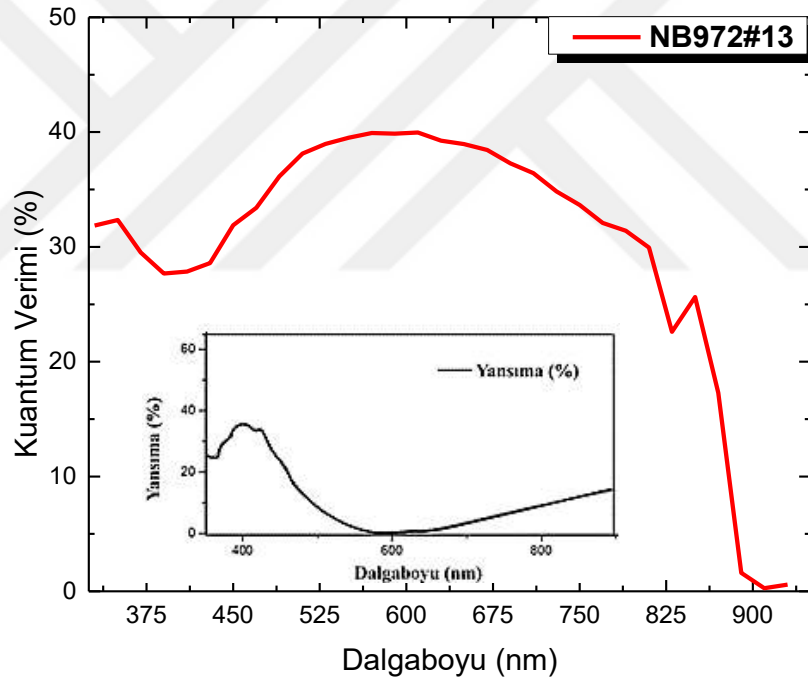


**Şekil 6.1.** *Altaş tabanlı GaAs/ESC hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış akım yoğunluğu-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri (a,b) TiO<sub>2</sub> kalınlığı 7,5 nm (c,d) TiO<sub>2</sub> kalınlığı 10 nm*

**Tablo 6.1.** *Altaş tabanlı GaAs/ESC (TiO<sub>2</sub>) kontrol güneş hücrenin I-V ölçümünden elde edilen hücre parametreleri.*

| Örnek    | TiO <sub>2</sub> kalınlık (nm) | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Verim, $\eta$ (%) | R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ ) | R <sub>s</sub> ( $\Omega$ ) |
|----------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| NB972#7  | 7,5                            | 0,26                | 0,27                                  | 24,9   | 0,02              | 3.230                        | 2.497                       |
| NB972#8  | 7,5                            | 0,22                | 1,34                                  | 10,2   | 0,06              | 425                          | 4.184                       |
| NB972#13 | 7,5                            | 0,26                | 3,55                                  | 14,8   | 0,14              | 127                          | 767                         |
| NB972#2  | 7,5                            | 0,22                | 14,91                                 | 36,2   | 1,19              | 178                          | 34                          |
| NB972#3  | 7,5                            | 0,22                | 12,18                                 | 35,6   | 0,95              | 161                          | 33                          |
| NB972#4  | 10                             | 0,26                | 9,89                                  | 22,2   | 0,57              | 90                           | 143                         |
| NB972#5  | 10                             | 0,18                | 13,67                                 | 35,6   | 0,87              | 163                          | 36                          |

Şekil 6.2’de 7,5 nm TiO<sub>2</sub> kaplı NB972#13 örneğine ait QE ölçüm sonucu verilmiştir. Diğer örneklerden ölçülen değerler düşük olduğundan buraya konulmamıştır. Ölçüm yapılan sistemin yansıma okuyan dedektörü arızalı olduğu için yansıma QE kayıplarında yüzey yansımalarının etkisi ne kadar olduğu değerlendirilememiştir. Ancak hücrenin teorik simülasyonu yapılırken hesaplanan yüzey yansıması eğrisi dikkate alındığında (Şekil 6.2) UV bölgedeki kayıpların tahmini olarak yarısının yansıma kaynaklı diğer yarısının bu bölgenin doğrudan GaAs/ESC arayüzüne çok yakın bölgede soğurulmasında oluşan taşıyıcıların arayüz kusurlarında birleşerek kaybolduğuna işaret etmektedir. 600 – 870 nm aralığında hesaplanan ortalama yüzey yansıması %10 civarındadır, dolayısıyla tüm spektrum dikkate alındığında üretilen taşıyıcıların %60 oranında kontaklara çekilemediği gözükmektedir.

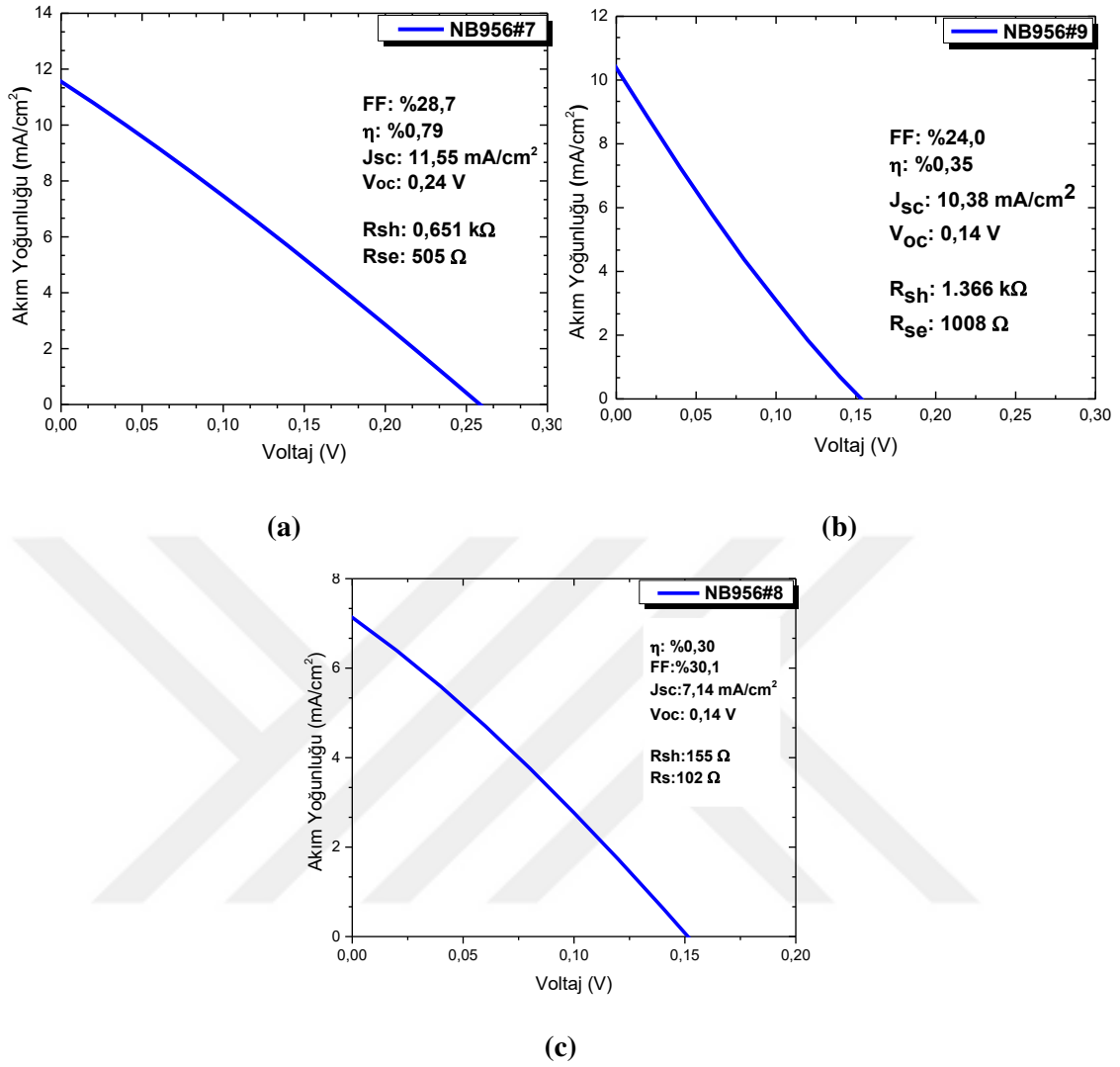


**Şekil 6.2.** Altaş tabanlı p-GaAs/n-TiO<sub>2</sub> heteroeklem güneş hücresinin kuantum verimi eğrisi ve hücre yapısı ön yüzeyinde hesaplanan yansıma eğrisi (iç şekil)

Esnek ince film GaAs/TiO<sub>2</sub> güneş hücreleri ile altaş tabanlı ince film güneş hücrelerinin fabrikasyonu aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Esnek GaAs/TiO<sub>2</sub> güneş hücrelerinin güneş simülatörü altında ölçülen I-V eğrileri Şekil 6.3 ve ölçüm sonuçlarından elde edilen hücre parametreleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Esnek güneş hücrelerin plastik taşıyıcıya yapıştırma, ELO ve fabrikasyon süreçleri sırasında önceden

bahsedilen kusur ve problemlerden dolayı birçok hücre ya fabrikasyon sonrası kısa devre olmuş ya da önemsenmeyecek verimlilikler ölçülmüştür, dolayısıyla burada sonuçlarına yer verilmemiştir. Şekilde ve tabloda sadece performansı görece yüksek sayılan hücrelerin ölçüm sonuçları sunulmuştur. Yine alttaş tabanlı hücrelerde olduğu gibi ölçülen performans değerleri teorik olarak beklenen seviyenin çok aşağısında kalmıştır.

TiO<sub>2</sub> kalınlığının 7,5 olduğu hücrede elde edilen en yüksek verimlilik değeri %0,79, 10nm olduğu hücrede ise %0,30 olarak ölçülmüştür. Hücre verimlerinin bu kadar düşük olmasının nedenleri yukarda alttaş tabanlı hücreler kısmında tartışılmıştır. Hücre parametreleri belli bir marjın dahilinde alttaş tabanlı olanlarla benzerlik göstermektedir. Bu durum hücre performansını etkileyen en kritik sebebin ESC ve TCO katmanlar olduğunu göstermektedir. Görece alttaş tabanlı muadiline göre daha iyi performans beklense de şu ana kadar elde edilen sonuçlar da bu durum gözlenememiştir ve esnek ince film hücre performans değerleri muadilinin bir miktar altında kalmıştır. Esnek hücrelerin kısmi olarak daha düşük performans göstermesinin bir diğer sebebi de yukarıda tartışıldığı gibi fabrikasyon süreçlerinde hücre yapısında oluşabilen mikro çatlaklar, delikler, ESC-TCO kaplama ve fırınlama süreçlerinde oluşabilecek filmde gerilme ve bükülme oluşumuyla tetiklenebilecek ESC-TCO malzemelerde yapısal değişikliklerle gelişebilecek fiziksel özellik değişimi vb. olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca alttaş tabanlı hücrelerde gözlenmeyen, sadece esnek hücrelerde gözlenen ön ızgara kontağın bazen hücre yüzeyine yeterince tutunamaması durumları da bu hücre performansı üzerindeki seri direnç etkisini daha da arttırmaktadır.

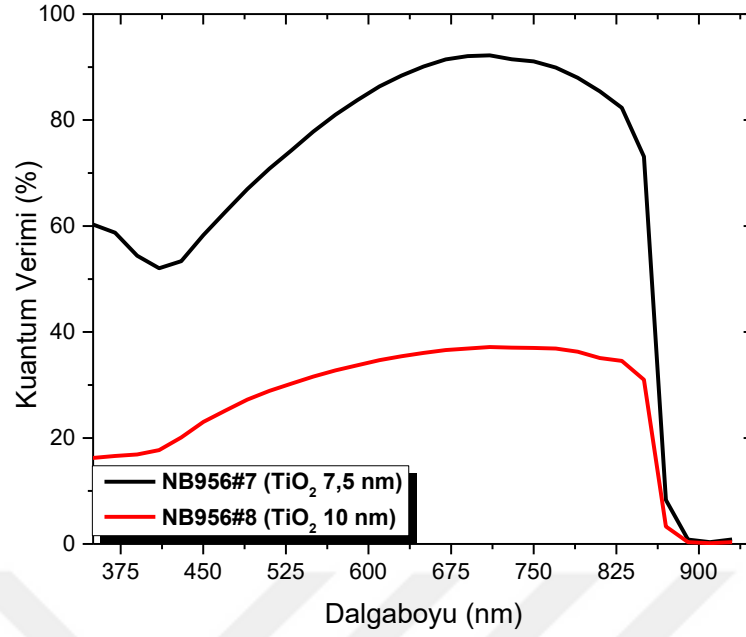


**Şekil 6.3.** Esnek ince film GaAs/TiO<sub>2</sub> hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış akım-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri

**Tablo 6.2.** Esnek ince film GaAs/TiO<sub>2</sub> güneş hücrelerin I-V ölçümünden elde edilen hücre parametreleri.

| Örnek   | TiO <sub>2</sub> kalınlık (nm) | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Verim, $\eta$ (%) | R <sub>sh</sub> ( $\Omega$ ) | R <sub>s</sub> ( $\Omega$ ) |
|---------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
| NB956#7 | 7,5                            | 0,240               | 11,55                                 | 28,7   | 0,79              | 651                          | 505                         |
| NB956#9 | 7,5                            | 0,240               | 10,38                                 | 24,0   | 0,35              | 1.366                        | 1.008                       |
| NB956#8 | 10                             | 0,140               | 7,14                                  | 30,1   | 0,30              | 155                          | 102                         |

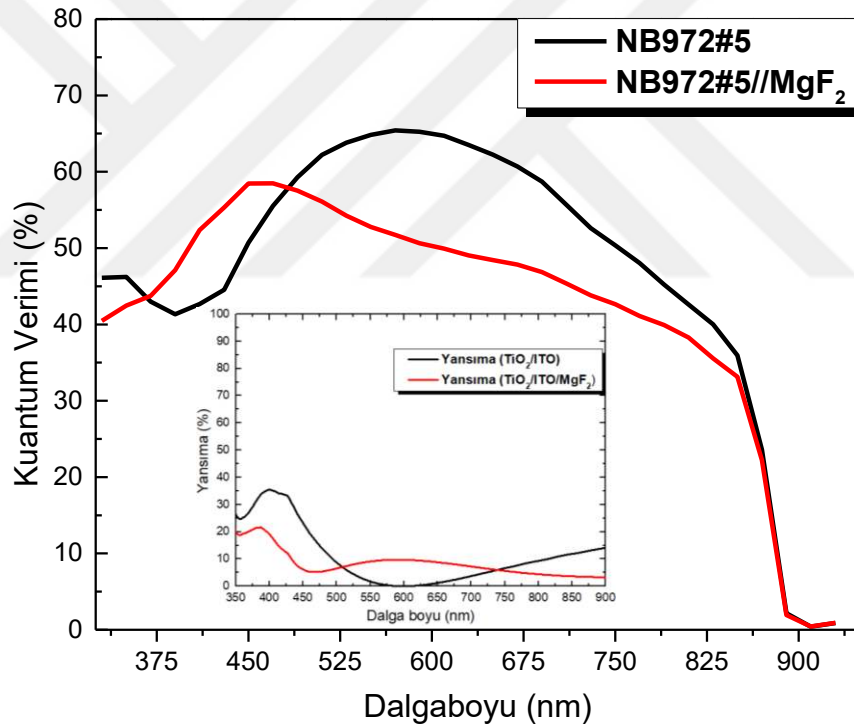
Şekil 6.4'te GaAs/TiO<sub>2</sub> ELO esnek hücrelerin ölçülen QE eğrileri verilmiştir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının 7,5 nm olduğu hücrenin QE değerleri oldukça yüksektir. Hücre yapıları aynı olduğu için alttaş tabanlı hücre için yukarıda hesaplanıp verilen yüzey yansıma spektrumu (Şekil 6.2 (iç şekil)) üzerinden değerlendirildiğinde yukarıda sunulan problemlere rağmen hücrenin potansiyelinin ne kadar yüksek olabileceği açıkça görülmektedir. Özellikle UV-mavi bölgede %35'e varan yansıma kayıplarına her türlü ESC, TCO ve fabrikasyon problemlerine rağmen hücrenin %60- %70 seviyelerinde QE değerine ulaşması oldukça heyecan vericidir ve tezin amacını da doğrular niteliktedir. Mükemmel bir yansıtma önleyici kaplama ve hücre üretim süreçlerinde yapılacak iyileştirmelerle neredeyse teorik olarak hesaplanan QE limit değerlerine ulaşılabilme potansiyeli olduğu görülebilmektedir. Laboratuvarımızda üretilen en yüksek verime (>%24) p-n eklem güneş hücresinin QE değeriyle kıyaslandığında hücrenin UV bölge değerlerinin bu haliyle bile çok iyi olduğunu göstermektedir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının 10 nm olduğu hücrenin QE değerleri 7,5 nm olana kıyasla tüm spektrum boyunca oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Bu kadar büyük farkın TiO<sub>2</sub> kalınlığından ziyade hücreler de var olan üretim süreci kusurlarla alakalı olduğudur. Tablo 6.2'de ki hücre parametreleri kıyaslandığında bu durum daha net görülmektedir. TiO<sub>2</sub> kalınlığının 7,5 nm olduğu hücrenin QE eğrisi baz alındığında I-V ölçümünden elde edilen verimlilik değerinin bu hücre için en azından %10 üzeri olması gerektiğidir. Ancak bu durum gözlenememiştir. Bunu en büyük sebebi QE ölçülürken ışık hücre üzerinde 1 mm<sup>2</sup> kadarlık bir alan üzerine düşürülmektedir eğer ışığın düşürüldüğü bölge nispeten kusursuzsa ve kontağa da yakın bir bölgedeyse hücrenin farklı bir bölgesinde var olan kusurların ölçülen spektruma etkisi nispeten küçük olabilmektedir. Ancak, I-V ölçümlerinde sinyal tüm aydınlatılmış yüzeyden alındığından hücre performansı kusurlu bölgenin performansı ile sınırlanmaktadır, ayrıca yüksek seri direnç performansı daha da düşürmektedir.



Şekil 6.4. Esnek ince film GaAs/TiO<sub>2</sub> heteroeklem güneş hücresinin kuantum verimlilik eğrisi.

Hücreler üzerinde özellikle yüksek enerji bölgesinde yansıtmasız yüzey kaplamanın etkisini görmek için herhangi bir özel yansıtma önleyici katman tasarımı yapmadan sadece 100 nm MgF<sub>2</sub> katman kullanarak yüzey yansıma spektrumu elde edilmiştir. 100 nm MgF<sub>2</sub> kalınlığı basit tek katman için yüzey yansımasının özellikle UV bölge yansımasının en düşük olduğu yaklaşık kalınlık olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.5'te 7,5 nm TiO<sub>2</sub> ESC katman içeren alttaş tabanlı hücrenin MgF<sub>2</sub> katman yokken ve varken ki yüzey yansıması hesaplanıp karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yine aynı şekilde hücrenin üzerine MgF<sub>2</sub> kaplanmadan önceki ve kaplandıktan sonrası ölçülmüş QE değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yansıma eğrilerine karşılaştırmalı olarak bakıldığında spektrumun 500 nm ve altında MgF<sub>2</sub> kullanıldığında yüzey yansıması önemli ölçüde azalmış, aynı şekilde 750 nm üzerinde de UV bölgedeki kadar etkin olmasa da fark edilir şekilde azalmıştır. Ancak güneş spektrumunun tepe bölgesi ve etrafını içine alan görünür bölgede (500 nm – 750 nm) yüzey yansıması artmıştır. Her ne kadar yansımada azaltılan toplam alan görünür bölgedeki yansıma artışından fazla gözükse de güneş spektrumunu kullanan pratik hücre açısından bakıldığında UV ve kızılötesi kazanç görünür bölge kayıplarıyla dengelenebilir seviyelerde gözükmemektedir. Pratik hücre üzerinde MgF<sub>2</sub> kaplamanın etkisini görmek için sunulan karşılaştırmalı QE eğrilerinde (Şekil 6.5) 500 nm altı verimlilik değerinin arttığı gözükmemektedir, ancak 750 nm üzerinde beklenen artış gözlemlenememiştir. 500 – 750 nm bandında ise beklenenden biraz daha

fazla düşüş göstermiştir. Bu farklılığın sebebi ya büyütülen katmanların gerçek yasıma değerinin (ölçülemediği için bilinmemektedir) teorik hesaptan beklenenin ötesinde farklı olması veya kaplama sonrası yapılan ölçümün homojen davranış gösteremeyen hücrenin farklı bir noktasından alınması olabilir.  $MgF_2$  kaplanması sonrası hücrenin dönüşüm verimliliği %0,87 değerinden %0,84 değerine düşmüş neredeyse teorik hesaptan beklediğimiz şekilde kayıp ve kazanç biri birini dengelemiş gözükmektedir. Her ne kadar detaylı bir tasarım içermeyen tek katman  $MgF_2$  kaplaması yansıma açısından bir kazanç sağlamasa da hücrenin davranışını anlamada kısmen de olsa kolaylık sağlamaktadır. Yüzey yansıtmasını minimum seviyeye indirebilmek için detaylı ikili-üçlü katman yansıtma önleyici katmanların araştırılması ve çalışılması gerekmektedir ancak bu konu tez kapsamının dışındadır.



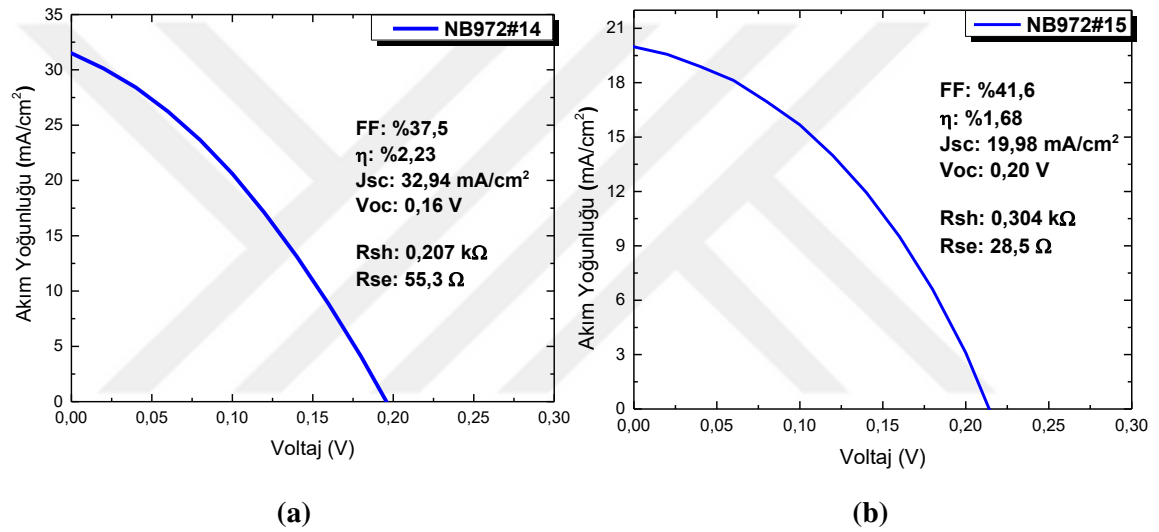
**Şekil 6.5.** Altaş tabanlı  $GaAs/TiO_2$  hücrenin  $MgF_2$  ARC kaplama öncesi ve sonrası kuantum verimlilik eğrisi, hücre yapısı yüzeyinde hesaplanan yansıma eğrisi ve 100 nm  $MgF_2$  kaplandıktan sonra hesaplanan yansıma eğrisi (iç şekil).

## 6.2. ZnO Katmanlı GaAs Güneş Hücresi

ESC katman olarak 6 ve 7 nm ZnO kullanılan alttaş tabanlı GaAs/ZnO kontrol hücrelerinin fabrikasyonu önceki bölümlerde anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. GaAs/TiO<sub>2</sub> hücrelerde olduğu gibi performans değeri nispeten iyi olan hücrelerin farklı ZnO kalınlığında en iyi performans gösterenlerinin I-V eğrileri Şekil 6.6'da ve I-V eğrisinden elde edilen hücre parametreleri diğer hücrelerinki ile Tablo 6.3'te verilmiştir. Bu hücrelerden elde edilen en yüksek verim ZnO katmanın 6 nm olduğu hücrelerden %1,71 ve 7,5 nm olduğu hücrelerden ise %2,23 tür. Bu değerler teorik simülasyonda daha yüksek verimlilik değerleri sunan GaAs/TiO<sub>2</sub> hücrelerin ölçülen pratik değerlerinden çok daha yüksektir. GaAs/TiO<sub>2</sub> hücrelere göre ZnO içeren hücrelerin V<sub>OC</sub> değerleri ortalama 40 mV daha düşük olsa da daha yüksek FF değeri ve ortalama 2,44 kat daha yüksek J<sub>SC</sub> değerine sahiptir. Teorik olarak açık devre voltajları aynı olmasına rağmen (1,13 V), pratikte GaAs/TiO<sub>2</sub> hücreden daha düşük görülmüştür. Bu düşüklüğün en önemli sebebi muhtemelen kaplanan ZnO filmlerin iş fonksiyonunun teorik değerden çok uzak olmasıdır. Bir diğer önemli sebep ise GaAs/ZnO arayüzeyinde yüksek kusur yoğunluğundan dolayı, hem Fermi seviyesinin sabit kalması ve taşıyıcı birleşmeleridir. Ayrıca paralel direnç değerlerinin çok düşük seviyede olması V<sub>OC</sub> kayıplarının bir diğer önemli sebebi olarak gözükmektedir. Benzer açıklamalar GaAs/TiO<sub>2</sub> hücreler içinde geçerlidir. Buradan da bu malzemelerin saçırtma (sputter) yöntemiyle kaplanarak yüksek verimli hücreler üretilmesinin çok zor olduğu anlaşılmaktadır. Bu yöntem kullanılacaksa da ya uzun süreli kaplama ve kaplama sonrası süreçlerin iyi çalışılması ya da saçırtma yönteminin arayüzü bozmayacağı şekilde ESC katman GaAs arasına ayrıca pasivasyon görevi görececek ince malzemelerin kullanılması gerekliliği gözükmektedir. Her ne kadar tez kapsamında sadece saçırtma yöntemi kullanılsa da aslında diğer bazı yöntemlerin (ALD, MOCVD vb.) daha kaliteli ESC ve arayüz için daha uygun olduğu bilinmektedir, ancak diğer yöntemler tez kapsamı dışında olup ilerleyen süreçte buradaki deneyimlerin aktarılacağı geleceğe dönük plan olarak durmaktadır.

Esnek ince film GaAs/ZnO hibrit hücrelerin fabrikasyonu da yapılmış ancak fabrikasyonu yapılan hücreler süreç sonunda ya tamamen kısa devre olmuş ya da dikkate alınmayacak ölçüde sonuçlar vermiştir dolayısıyla burada sonuçları sunulmamıştır. Bu kısa devre oluşumuna yol açan nedenler önceki bölümlerde anlatıldığı gibi polyamid kaynaklı olarak kaldırılan filmlerde doğrudan arka kontağa kadar ilerleyen deliklerin (pin hole) oluşumudur. Dolayısıyla bu delik yapılarının CdTe veya CIGS hücre

teknolojilerinde olduğu gibi yama yapma yöntemiyle kapatılarak kısa devre oluşumunun önüne geçilebilir, ancak zaman yetersizliğinden böyle bir çalışma yapılamamıştır. Bir diğer kısa devre ise alttaş tabanlı hücreleri de kapsayan ve hücrelerin performansını olumsuz yönde etkileyen ESC katmanlarda oluşan delik yapıları olabilmektedir. Delikli ESC katman ya üzerine kaplanan TCO katmanında delikli olmasına yol açabilmekte bu durumda ön ızgara kontak bu mikroskobik deliklerden doğrudan GaAs katmana temas etmekte, ya da ITO katman  $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$  katmanlardaki deliklerden doğrudan GaAs katmana ulaşarak hücre karakteristiğini bozmakta, ya da bu iki etki aynı anda olabilmektedir.

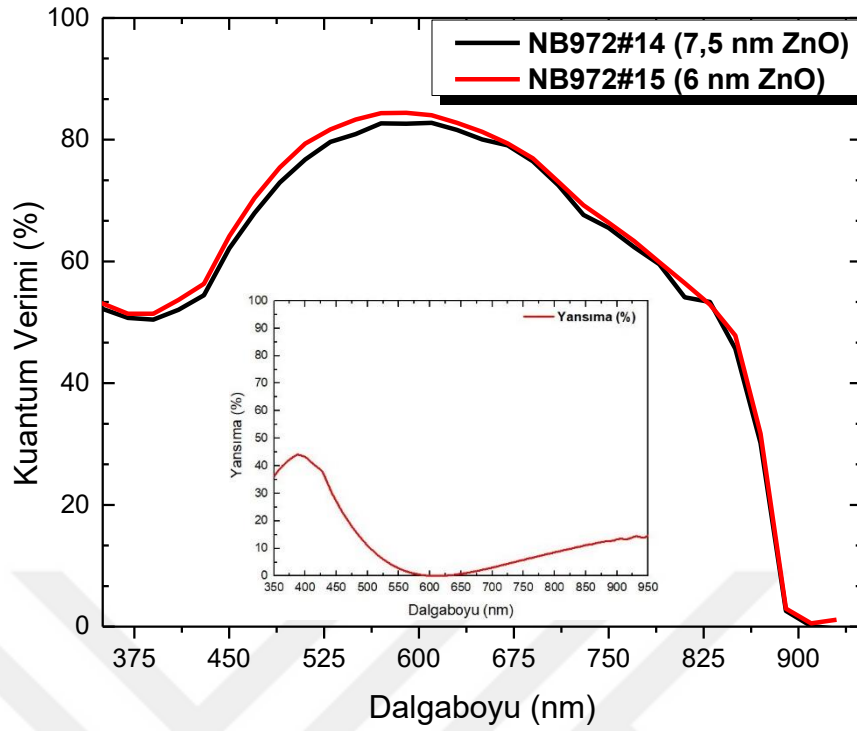


**Şekil 6.6.** Alttaş tabanlı GaAs/ESC hücrenin AM1.5G spektrumunda alınmış akım yoğunluğu-voltaj eğrisi ve hücre parametreleri (a) ZnO kalınlığı 7,5 nm (b) ZnO kalınlığı 6 nm

**Tablo 6.3.** Farklı kalınlıklarda ZnO katmanı içeren alttaş tabanlı güneş hücresi ölçüm sonuçları

| Örnek    | ZnO kalınlık (nm) | $V_{oc}$ (V) | $J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ ) | FF (%) | Verim, $\eta$ (%) | $R_{sh}$ ( $\Omega$ ) | $R_s$ ( $\Omega$ ) |
|----------|-------------------|--------------|-------------------------------|--------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| NB972#9  | 7,5               | 0,20         | 18,96                         | 31,9   | 1,21              | 76                    | 39,6               |
| NB972#14 | 7,5               | 0,16         | 24,91                         | 37,5   | 2,23              | 207                   | 55,3               |
| NB972#10 | 7,5               | 0,22         | 11,16                         | 29,2   | 0,72              | 188                   | 76,6               |
| NB972#15 | 6                 | 0,20         | 19,98                         | 41,6   | 1,68              | 304                   | 28,5               |
| NB972#16 | 6                 | 0,18         | 22,3                          | 42,6   | 1,71              | 379                   | 45,6               |

Şekil 6.7’de yukarıda I-V grafiği (Şekil 6.6) verilen GaAs/ZnO alttaş tabanlı güneş hücrelerinin QE ve yapıların 7nm ZnO kalınlığı için teorik olarak hesaplanan yüzey yansıma eğrileri verilmiştir. Her iki hücrenin de eğrisi ZnO kalınlığından bağımsız aynı davranışı göstermektedir. 350-600 nm arasında yüksek yansıma kayıplarına rağmen QE değeri %50 ve üzerindedir, şekilde verilen yansıma eğrisi göz önüne alınırsa, yapılacak iyi bir yansımaz yüzey kaplamayla bu bölgede verimliliğin %95 seviyesine çıkabileceği gözükmemektedir. Bu hücrelerin UV bölge cevabı da aynı TiO<sub>2</sub> ESC katmanlı hücreyle (Şekil 6.5 siyah eğri) benzer davranış sergilemektedir ancak idealize edilmiş yansımaz durumda GaAs/ZnO hücre ZnO’nun yüksek bant aralığından dolayı daha iyi performans sergileme potansiyeline sahip olabileceği gözükmemektedir. 600 nm üzerinde düşük enerjili bölgede yansıma kaynaklı kayıplar GaAs bant kenarında %15’e kadar çıkmaktadır. Yansıma kayıpları çıkarıldığında geriye kalan kayıpların soğurucu bölge ve arayüz birleşme kayıpları olduğu gözükmemektedir. Beklenenin aksine (yüzey yansıması etkisi ihmal edilirse) UV bölge performansının görünür bölge ve kızılötesi bölgeden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Benzer durum GaAs/TiO<sub>2</sub> hücre içinde gözükmemektedir (Şekil 6.5 siyah eğri). Yansıma dışındaki diğer kayıpların GaAs/ESC ve ESC/ITO katmanından kaynaklanan soğurucu kayıplarla birlikte yüzey/arayüz kusur kaynaklı yeniden birleşme ve yanal yük taşıyıcıların taşınma kayıpları gibi yüzeyle ilgili kayıplardan kaynaklanmaktadır [95].



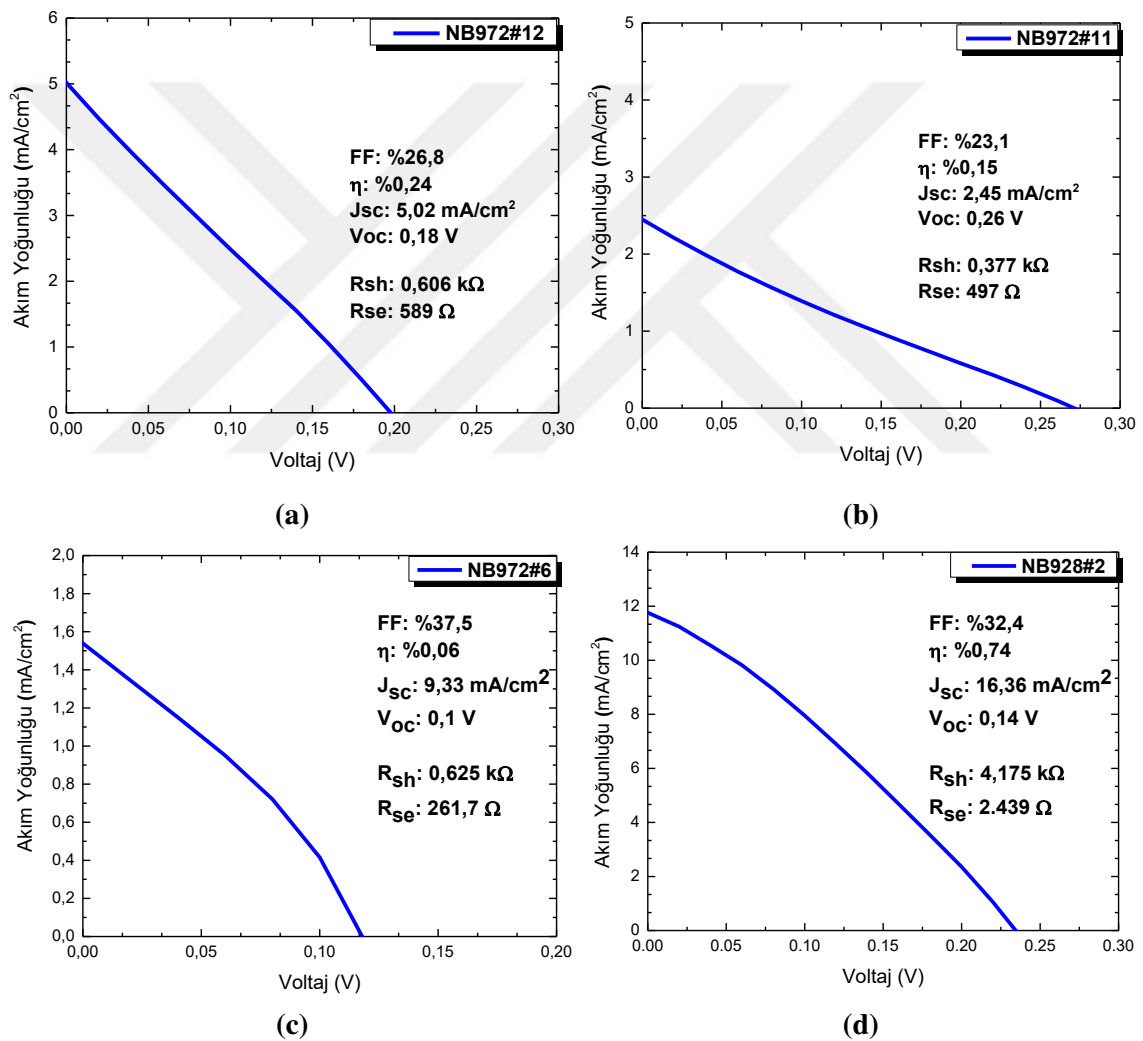
**Şekil 6.7.** Alttaş tabanlı GaAs/ZnO hetero eklem güneş hücresinin kuantum verimlilik ve hesaplanan yüzey yansımaya eğrileri.

### 6.3. TiO<sub>2</sub>/ZnO İki Katman ESC GaAs Güneş Hücresi

GaAs/ESC hibrit hücrelerde iki katman ESC yapısının hücre performansı üzerine etkisini görmek için yapılan simülasyonda ikili katman TiO<sub>2</sub>/ZnO hücrenin TiO<sub>2</sub> tek katman hücrelerle hem yüzey yansımalarının dahil edildiği ve hem de dahil edilmediği durumda çok yakın performans gösterdiği hesaplanmıştı. Her iki durumda da GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO hücrelerin p-n eklem hücreden de daha iyi performans sergilediği hesaplanmış idi. İki katman ESC yapısının aygıt fabrikasyon sürecindeki olumlu olumsuz etkisini görmek ve incelemek için sabit TiO<sub>2</sub> (7,5 nm) kalınlığı için üzerine 6 ve 7,5 nm ZnO kaplanarak GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO hücrelerin fabrikasyonu da gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.8’de bu hücrelerden ölçülen I-V eğrileri ve Tablo 6.4’te bu eğrilerden elde edilen hücre parametreleri verilmiştir. Bu hücre gruplarından en yüksek verim esnek ince film tabanlı GaAs/TiO<sub>2</sub>(7,5 nm)/ZnO(6 nm) ESC parametrelili hücreden %0,74 olarak elde edilmiştir. Her ne kadar diğer hücrelerin kısa devre olmasından dolayı karşılaştırmak sorunlu olabilse de GaAs/TiO<sub>2</sub> tek katman esnek ince film hücrelerin en yüksek verimlilik değeriyle neredeyse aynıdır. Alttaş tabanlı GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO hücrelerin verimlilik değerleri tek katman ESC (TiO<sub>2</sub> ve ZnO) alttaş tabanlı hücrelerin değerlerinin genel

olarak çok altında kalmaktadır. Her ne kadar ESC saçıtırma ve fabrikasyon süreçlerinin getirdiği problemlerden dolayı net bir şey söylemek zor olsa da iki katman ESC yapısı kullanmanın bu çalışmada kullanılan yöntem ve yaklaşımlara göre pek bir anlamı yok gözükmemektedir. Tek katman ESC hücrelerde yukarıda bahsedilen sorunların tamamı iki katmanlı olanlar içinde geçerlidir. Sadece fazladan aygıt fabrikasyon ve optimizasyon sürecini bir miktar daha zorlu hale getirmiştir. Ancak başka yöntemlerle yapılacak ESC kaplama süreçleri iki katman yapıların daha iyi kullanılmasını sağlayabileceği öngörülmektedir.

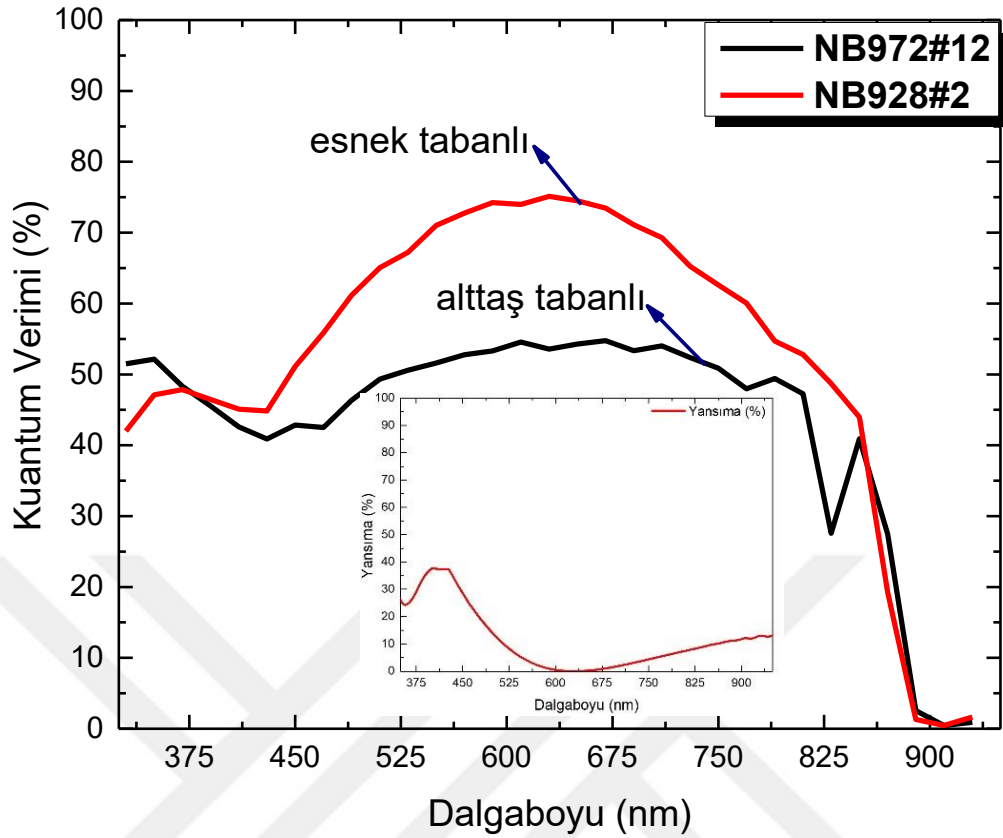


**Şekil 6.8.** İki katman  $TiO_2/ZnO$  ESC yapılı GaAs hücrelerin AM1.5G spektrumunda alınmış I-V eğrileri: Altaş tabanlı hücreler (a,b,c) ve esnek ince film hücre (d).

**Tablo 6.4.** *Alttaş tabanlı ve esnek ince film iki katman ESC GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO güneş hücrelerinin hücre parametreleri*

| Örnek                        | TiO <sub>2</sub> /ZnO kalınlık(nm) | V <sub>oc</sub> (V) | J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> ) | FF (%) | Verim (η) (%) | R <sub>sh</sub> (Ω) | R <sub>s</sub> (Ω) |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|---------------|---------------------|--------------------|
| NB972#12                     | 7,5/6                              | 0,18                | 5,02                                  | 26,8   | 0,24          | 606                 | 589                |
| NB972#11                     | 7,5/7,5                            | 0,26                | 2,45                                  | 23,1   | 0,15          | 377                 | 497                |
| NB972#6                      | 7,5/7,5                            | 0,10                | 9,33                                  | 37,5   | 0,06          | 625                 | 262                |
| NB928#2<br>(Esnek ince film) | 7,5/6                              | 0,14                | 16,36                                 | 32,4   | 0,74          | 4.175               | 2.439              |

Şekil 6.9’da esnek ve alttaş tabanlı örneklere ait karşılaştırmalı QE ölçüm sonuçları verilmiştir. QE eğrileri ve yüzey yansıma spektrumu (iç şekil) tek katmanlı ESC hücrelerin davranışına çok benzemektedir. Yüzey yansımasının ihmal edildiği durumda bu hücrelerinde UV-mavi bölgede %90 ve üzeri değerleri göstermektedir. Her iki hücre tipinin (alttaş, esnek) verimlilikleri korale olmuş bir şekilde enerji dönüşüm verimlilik değerlerini karşılaştırmalı olarak yansıtmaktadır. QE değerleri baz alındığında hücrelerden elde edilen dönüşüm verimlilik değerlerinin çok daha yüksek olması gerekirken, yüksek seri, düşük paralel direnç ve düşük açık devre vb sorunlardan dolayı maalesef gerek daha önceki tek katman ESC’li ve gerekse bu hücreler olması gereken performansı gösterememişlerdir.



**Şekil 6.9.** *Altaş ve esnek tabanlı GaAs/TiO<sub>2</sub>/ZnO güneş hücreleri için kuantum verimlilik ve hesaplanan yüzey yansıma eğrisi*

Elde edilen verimlilik değerleri literatürde var olan altaş tabanlı GaAs/ESC ve InP/ESC hücrelerin verimlilik değerlerinden daha düşüktür. Ancak esnek ince film hücreler ilk defa bu çalışma kapsamında gerçekleştirildiğinden benzer bir kıyaslama yapılamasa da altaş tabanlı var olanlardan daha düşüktür. Bu düşük performansın en önemli nedeni ESC kaplama için kullanılan yöntem olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca kullanılan TCO ve ESC hedef malzeme kalitesinin de bu işler için ne kadar iyi olduğu bilinmemektedir. Arayüzü ve GaAs soğurucu katmanı bozmayacak şekilde daha uygun kaplama yöntemlerle (ALD, MOCVD vb.) ve fabrikasyon süreci iyileştirmelerle çok daha yüksek verimlilik değerlerine çıkılabileceği QE ölçüm sonuçlarından anlaşılabilmektedir.

## 7. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, ilk kez esnek ince film GaAs/ESC hibrit güneş hücreleri tasarlanmış, teorik simülasyonları yapılmış ve başarılı bir şekilde hücre fabrikasyonları yapılmış, bu teknolojinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Taşıyıcı seçici kontakların, katkılama ve p-n eklem oluşumuna ilişkin teknolojik zorlukların üstesinden gelme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu literatürde yapılan çalışmalarda belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Ancak, her yeni teknolojide olduğu gibi, bu taşıyıcı seçici kontakların ticari olarak faydalı herhangi bir uygulamada kullanılabilmesi için bazı zorlukların ele alınması gerekmektedir. Bu zorluklar, taşıyıcı malzeme uyumluluğu, üretim süreçleri, performansı ve seçici kontakların kararlılığı ile ilgilidir. ESC olarak kullanılacak malzemenin, kullanılan diğer yarı iletken malzemelerle uyumlu olması ve aygıt bütünlüğünü bozmadan entegre edilebilmesi gerekmektedir. Bu aygıtların üretimi sırasında yüksek hassasiyet ve kontrol gerektiren işlemler, büyük ölçekli üretimde zorluklar yaratabilir. Üretim süreçlerinin optimize edilmesi ve ölçeklendirilebilir hale getirilmesi önemlidir. ESC'lerin, mevcut teknolojilerle karşılaştırıldığında daha yüksek verimlilik sağlaması ve enerji kayıplarını en aza indirmesi beklenmektedir. Bu nedenle, bu seçici kontakların optimize edilmesi ve performanslarının artırılması gerekmektedir. ESC'lerin zamanla performanslarını koruyabilmeleri ve çevresel koşullara dayanıklı olmaları gerekmektedir.

Literatürde alttaş tabanlı GaAs/ESC güneş hücreleri için bildirilen verimlilik değerleri, standart p-i-n mimarisi kullanan GaAs güneş hücrelerinin bildirilen en yüksek verimliliklerinin çok altında kalmaktadır. Detaylı bir çalışma olmamasına rağmen, ESC tabanlı güneş hücrelerinin performansının yüksek arayüz kusur yoğunluğu nedeniyle düşük olabileceği görülmektedir. Si ve CIGS güneş hücrelerinden farklı olarak, III-V grubu güneş hücrelerinde -InP için birkaç çalışma olmasına rağmen- GaAs için araştırmalar nispeten çok azdır ve bu nedenle, III-V araştırma topluluğu tarafından III-V güneş hücrelerinde ESC içeren çalışmaları geliştirmek için çok daha fazla çaba ve araştırma yapılması gerekmektedir. Diğer yandan, InP güneş hücreleri üzerinde yapılan çalışmalardan, özellikle GaAs güneş hücreleri uygulamalarına da uyarlanabilecek pasivasyon teknikleri ve düşük temas direnci üretimi konularında birçok önemli bilgi edinilebilir. Bununla birlikte, ESC'lerin; katkılama, kontrollü p-n eklem oluşumu ve alaşım bileşimi örgü uyumluluğun gerektiği III-V güneş hücrelerin üretim ve fabrikasyonunun karmaşık olabileceği durumlarda, gelecekteki uygulamalar için maliyet

etkinlik, verimlilik ve üretim süreçleri açısından büyük bir potansiyele sahip olduğu gözükmemektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, esnek ince film GaAs güneş hücreleri için farklı kalınlık parametreleri göz önüne alınarak  $\text{TiO}_2$ , ZnO ve  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$  ikili katmanların ESC olarak kullanılabilmesi ve olası potansiyelini görebilmek için teorik modelleme ve simülasyonlar yapılmıştır. Aynı şekilde performans değerlerini karşılaştırmak için p-n eklem hücrenin de simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tüm GaAs/ESC hibrit hücrelerde TCO katman olarak sabit kalınlıkta 75 nm ITO kullanılmıştır. Hesaplardan elde edilen enerji bant hizalanmasında bu malzemelerin deşiklere karşı yüksek elektrona karşı neredeyse hiç bariyer göstermediği görülmüştür, ancak  $\text{TiO}_2$  te herhangi bir bariyer görülmezken ZnO elektrona karşı bir miktar bariyer göstermektedir. Bu durumda simülasyon sonucunda GaAs/ZnO hücreler de düşük FF faktörü elde edilmesine dolayısıyla daha düşük verimlilik değerine sebebiyet verdiği görülmüştür. Simülasyonun ilk aşamasında hücre yüzeyinde herhangi bir yansıtma önleyici olmadığı durum için, hücre yapılarının yüzey yansıma eğrileri oluşturulmuş ve hesaplamalara dahil edilmiştir. Yüzey yansımalarının dahil edildiği durumda bile özellikle GaAs/ $\text{TiO}_2$  hücrelerin, yüzey yansımalarının hesaba katılmadığı (mükemmel yansıtma katmanı olan) GaAs p-n hücrenin verimlilik değerine yaklaşabildiği görülmüştür. Simülasyonun ikinci aşamasında GaAs/ESC hibrit hücrelerle p-n eklem hücrelerin karşılaştırmasını daha sağlıklı bir şekilde yapabilmek için hesaplarda yüzey yansıması ihmal edilmiştir. Bu durumda yapılan hesaplamalarda tüm hibrit hücrelerin p-n eklem referans hücreden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Özellikle hibrit hücrelerin beklenildiği gibi spektrumun yüksek enerjili kısmında (görünür-UV) performansının çok daha iyi olduğu doğrulanmıştır. Yansımanın ihmal edildiği durumda hibrit hücrelerin teorik olarak %32 enerji verimi değerlerine ulaşabildiği hesaplanmıştır. İyi bir TCO katman mühendisliğiyle GaAs/ESC hücrelerin herhangi bir yansıtma önleyici katman bile gerektirmeden yüksek verimli maliyet etkin bir şekilde üretilme potansiyeli olduğu anlaşılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, simülasyonu yapılan hücrelerin fabrikasyon ve karakterizasyon süreçleri yapılmıştır. Esnek ince film GaAs/ESC hibrit hücreler başarılı bir şekilde üretilip karakterizasyonları yapılmıştır. Tasarlanan hücrelerin yarı GaAs hücre yapısı MBE yöntemiyle epitaksiyel olarak büyütülmüş, büyütülen yarı hücre yapıları GaAs alttaş üzerinden başarılı bir şekilde ELO yöntemi uygulanarak esnek polyamid

taşıyıcılara nakledilmiştir. Saçtırma (sputter) tekniği kullanılarak polyamide nakledilen yarı hücreler üzerine ESC katman/katmanlar ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2/\text{ZnO}$ ) kaplanmış, üzerine saçtırma veya e-demet tekniğiyle TCO olarak ITO kaplanmış, ITO üzerine termal veya e-demet tekniğiyle Ag ızgara kontaklar atılarak hücre fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Fabrikasyon öncesi ESC ve TCO katmanların optimizasyonu için RTP fırınında ısıtma süreçlerinin iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem süreçleri polyamid taşıyıcının yapısal olarak etkilenmeyeceği sıcaklık değerlerine göre belirlenmiştir. Esnek ince film hücrelerin süreçlerini kontrol etmek ve olası problemleri iyi değerlendirebilmek için ayrıca alttaş tabanlı GaAs/ESC hibrit kontrol hücre fabrikasyonları da yapılmıştır.

Fabrikasyon süreci tamamlanan hücrelerin performans değerleri standart koşullarda ölçülen I-V ve QE eğrileri ve bu eğrilerden elde edilen hücre parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Teorik simülasyonlarda yüzey yansımalarının dahil edildiği (tezdeki fabrikasyonu yapılan hücrelerin yapıları) durumda %28-%29 verimlilik elde edilebilirken, fabrikasyon sonucu elde edilen en yüksek dönüşüm verimliliği %2,23 ESC olarak  $\text{ZnO}$  tek katman kullanılan hücreden elde edilmiştir. Diğer alttaşlı ve esnek ince film hücrelerin değerleri daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ancak QE ölçümlerinde görece yüksek değerler olmasına rağmen bu durum hücre performansına yansımamıştır. Hücrelerde görülen düşük paralel yüksek seri direnç, düşük açık devre voltajı ve düşük akım değerleri hücre performansını kısıtlamıştır. Bu kötü hücre parametrelerinin en büyük sebebi ESC katmanların kaplama sürecinde GaAs soğurucu katmanın yüksek enerjili iyonlarla kalitesinin bozulması, GaAs/ESC arayüzünün kusur yoğunluğunun çok fazla olması, ESC ve TCO malzemelerin elektriksel özelliklerinin düşük dirençli yapılar olarak üretilmemesi olarak görülmektedir. Bu süreçlerin daha iyi, detaylı şekilde çalışılması ve kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca GaAs soğurucu katmanda ve arayüzde oluşan kusurların çok iyi pasivize edilmesi için detaylı bir şekilde çalışılması gerekmektedir. Tez çalışması sürecinde zaman kısıtı nedeniyle bu konular üzerine yeterince yoğunlaşılammıştır. Ancak hücre yapısında ve fabrikasyon süreçlerinde oluşan her türlü olumsuzluğa rağmen özellikle QE ölçümlerinden elde edilen değerler bu hücrelerin olası potansiyellerini göz önüne koymuştur. Özellikle hücrelerin UV bölge performansları bu halleriyle bile tasarlanacak iyi bir yansımaz yüzey yapısıyla neredeyse teorik hesaplamalardaki limit değerlere kolayca ulaşılabilceğini göstermektedir.

Tek katman ve ikili katman ESC hücrelerin elde edilen sonuçları arasında çok büyük farklılıklar gözlenememiştir. Ancak teorik beklentinin aksine ZnO tek katman ESC hücrelerin bu çalışma koşullarında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak ZnO malzemenin daha düşük güç değerlerinde kaplandığından GaAs soğurucu katmanın daha az yıpranmış olması ve GaAs/ZnO kusur yoğunluğunun daha az olduğu tahmin edilmektedir. Ancak bu tahminleri değerlendirebilecek ve olası problemlerin kaynağını doğru tespit edebilecek karakterizasyonların yapılması gerekmektedir. Ayrıca gerek ESC ve gerekse TCO malzemelerde elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi için çeşitli katkılama yöntemlerinin araştırılması gerekli görülmektedir. Kaplanan ESC ve TCO katmanın iş fonksiyonu vb. özelliklerinin de kaplama süreci ve sonraki ısıtma işlem süreçlerinde nasıl değiştiğinin de UPS ve benzeri yöntemlerle dikkatli bir şekilde araştırılması gerekliliği gözükmemektedir. Ancak bu süreçler bu tez çalışması kapsamında yapılamamıştır ancak ileriye dönük süreçte bu konuları çalışacak kişiler için çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla bir perspektif çizilebildiğini düşünmekteyiz.

Sonuç olarak bu tez çalışması ile ilk kez esnek ince film GaAs tabanlı yarı hücre yapısı üzerine ESC katmanları başarılı bir şekilde entegre edilerek esnek ince film GaAs/ESC hibrit güneş hücreleri başarılı bir şekilde üretilerek test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar her ne kadar beklentiden uzak olsa da ESC katman yapıları ve fabrikasyon süreçlerinde yapılacak iyileştirmelerle GaAs tabanlı esnek ince film hücre teknolojilerine büyük katkı yapma potansiyeline sahiptir.

## KAYNAKÇA

- [1] NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> adresinden alındı. (Erişim tarihi: 23.05.2024)
- [2] Li, J. (2021). A brief review of high efficiency III-V solar cells for space application, *Frontiers in Physics*, 8(631925).
- [3] Raya-Armenta, J. M. (2021). A short review of radiation-induced degradation of III-V photovoltaic cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233(111379).
- [4] Mattos, L. S. (2012). New module efficiency record: 23.5% under 1-sun illumination using thin-film single-junction GaAs solar cells, *38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, s. 003187-003190.
- [5] Aierken, A. (2008). *Passivation of GaAs Surfaces and fabrication of self-assembled In(Ga)As/GaAs quantum ring structures*. Doktora Tezi, Helsinki University of Technology, Helsinki.
- [6] PVEducation (2024) <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-coefficient> adresinden alındı. (Erişim tarihi: 20.04.2024)
- [7] Shockley, W. ve Queisser, H. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics* (32), s. 510-519.
- [8] Li, X. vd. (2021). Silicon heterojunction-based tandem solar cells, *Nanophotonics*, 8(2), s. 2001-2002.
- [9] Philipps, S. vd. (2012). High Efficiency III-V Multijunction Solar Cells. *Practical Handbook of Photovoltaics*, s. 417-448.
- [10] Kurtz, S. R. vd. (1988). Electroreflectance and photorefectance of GaInP. *Solar Cells*, 24(Issues 3-4), s. 307-312.
- [11] Geisz, J. F. vd. (2018). Building a six-junction inverted metamorphic concentrator solar cell. *IEEE J Photovoltaics*, 8(2), s. 626-632.
- [12] Green, M. vd. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 63). *Prog. Photovolt Res. Appl.*(32), s. 3-13.
- [13] Feifel, M. vd. (2021). Epitaxial GaInP/GaAs/Si triple-junction solar cell with 25.9% AM1.5g efficiency enabled by transparent metamorphic  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  step-graded buffer structures. *Sol RRL*, 5(5), 2000763.

- [14] Essig, S. vd. (2017). Raising the one-sun conversion efficiency of III–V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions, *Nature Energy* 2, 17144.
- [15] Sinharoy, S. vd. (2002). Progress in the development of metamorphic multi-junction III-V space solar cells. *Prog. Photovoltaics. Res. Appl.*, s. 327-432.
- [16] France, R. M. vd. (2016). Design flexibility of ultrahigh efficiency four-junction inverted metamorphic solar cells. *IEEE J. Photovoltaics*, 6(2), s. 578-583.
- [17] Long, J. vd. (2019). High efficiency thin film GaInP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) solar cells based on electroplating process. *Journal of Crystal Growth*(513), s. 38-42.
- [18] Aierken, A. vd. (2018). Effects of proton irradiation on upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cell*(185), s. 36-44.
- [19] Kitai, A. (2011). *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The role of the PN junction*. John Wiley and Sons, Ltd.
- [20] Fraunhofer ISE (2024). <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics-materials-cells-and-modules/iii-v-solar-cells-modules-and-concentrator-photovoltaics.html>. adresinden alındı. (Erişim tarihi: 20.04.2024).
- [21] NASA (2024). <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/impact-story-roll-out-solar-arrays/>. adresinden alındı. Erişim tarihi: (20.04.2024)
- [22] Neamen, D. (2012). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, 4th Edition*. New York, ABD: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [23] Sze, S. M., Lee, M. (2012). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley Sons, Inc.
- [24] Alferov, Z. I. vd. (1971). Solar-energy converters based on p-n  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs heterojunctions. *Soviet Physics: Semiconductors*,(4), 2047.
- [25] Venkatasubramanian, R. vd. (1997). 18.2% (AM1.5) efficient GaAs solar cell on optical-grade polycrystalline Ge substrate. *25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, s. 31-36. Washington.

- [26] Alferov, Z. I. vd. (2008). Chapter 4: III-V Solar Cells and Concentrator Arrays, *High-efficient Low-Cost Photovoltaics* (Cilt Second Edition). Springer Series in Optical Sciences (140), s. 101-141.
- [27] Greenaway, A. L. vd. (2017). Low-Cost Approaches to III-V Semiconductor Growth for Photovoltaic Applications. *ACS Energy Letter*(2), s. 2270-2282.
- [28] Schermer, J. J. vd. (2005). Epitaxial Lift-Off for large area thin film III/V devices. *Phys. Status Solid*, 202(4), s. 501-508.
- [29] Bedell, S. W. vd. (2012). Removal of Si Ge and III-V layers by controlled spalling to enable low-cost PV technologies. *IEEE Journal of Photovoltaic*, 2(2), s. 141.
- [30] Moon, S. vd. (2016). Highly efficient single-junction GaAs thin-film solar cell on flexible substrate. *Scientific Reports*, 6(30107).
- [31] Konagai, M. vd. (1978). High efficiency GaAs thin film solar cells by peeled film technology. *Journal of Crystal Growth*(45), s. 277-280.
- [32] Bauhuis, G. J. vd. (2010). Wafer reuse for repeated growth of III-V solar cells. *Prog. Photovolt: Res Appl.*(18), s. 155-159.
- [33] Lee, K. vd. (2012). Reuse of GaAs substrates for epitaxial lift-off by employing protection layers. *Journal of Applied Physics*(111), 0033532.
- [34] Wu, F. L. vd. (2014). Improvement in separation rate of epitaxial lift-off by hydrophilic solvent for GaAs solar cell applications. *Solar Energy Materials Solar Cells*(112), s. 233-240.
- [35] Kayes, B. M. vd. (2014). Flexible thin-film tandem solar cells with >30% Efficiency. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), s. 729-733.
- [36] Tatavarti, R. vd. (2008). Lightweight, low cost GaAs solar cells on 4" epitaxial liftoff (ELO) wafers. *33rd IEEE PV Specialist Conference (PVSC): Devices and Defects*. San Diego, USA.
- [37] Lee, K. vd. (2014). Non-destructive wafer recycling for low-cost thin-film flexible optoelectronics. *Advance Functional Mater.*(24), s. 4284-5291.
- [38] Moon, S. vd. (2016). Highly efficient single-junction GaAs thin-film solar cell on flexible substrate. *Science Report*(6), 30107.

- [39] Cheng, C. W. vd. (2013). Epitaxial lift-off process for gallium arsenide substrate reuse and flexible electronics. *Nature Commun.*(4), 1577.
- [40] Sharma, S. vd. (2023). Conversion efficiency improvement of ELO GaAs solar cell, deposited on water soluble sacrificial buffer. *Surface and Coating Tech.*(456), 129282.
- [41] Stender, Christopher L. vd. (2015). Flexible and lightweight epitaxial lift-off GaAs multi-junction solar cells for portable power and UAV applications. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, s. 1-4.
- [42] Van Geelen, A. vd. (1997). Epitaxial lift-off GaAs solar cell from a reusable GaAs substrate. *Materials Science and Engineering*(B45), s. 162-171.
- [43] Boucher, J. W. vd. (2017). Analysis of performance-limiting defects in pn junction GaAs solar cells grown by water-mediated close-spaced vapor transport epitaxy. *Solar Energy Mater. Solar Cells*(159), s. 546-552.
- [44] Metaferia, W. vd. (2018). n-type doping and morphology of GaAs nanowires in Aerotaxy. *Nanotechnology*(29), 285601.
- [45] Sun, Y. vd. (2016). Voc degradation in TF-VLS grown InP solar cells. *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, s. 1934-1937.
- [46] Saito, Y., Hashimoto, K. (1994). Efficient ZnO/CdS/InP heterojunction solar-cell. *1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion/ IEEE Potovoltaics Specialists Conference*, s. 1867-1870.
- [47] Cuevas, A. vd. (2018). Carrier population control and surface passivation in solar cells. *Solar Energy Material and Solar Cell*, (184), s. 38-47.
- [48] Würfel, U. vd. (2015). Charge carrier separation in solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(1), 461.
- [49] Tong, J. vd. (2017). Solution-processed molybdenum oxide for hole-selective contacts on crystalline silicon solar cells. *Applied Surface Science*,(423), s. 139-146.
- [50] Yang, X. vd. (2017). Industrially feasible, dopant-free, carrier-selective contacts for high-efficiency solar cells. *Progress Photovoltaics Res. Appl.*, 25(11), s. 896-904.

- [51] Feldman, F. vd. (2014). Carrier selective contacts for Si solar cells. *Applied Phys. Letter*, 104(18), 181105.
- [52] Wan, K. S. (2017). Tantalum oxide electron-selective heterocontacts for silicon photovoltaics and photoelectrochemical water reduction. *ACS Energy Letters*, 3(1), s. 125-131.
- [53] Yang, X. A. vd. (2018). Tantalum nitride electron-selective contact for crystalline silicon solar cells. *Advanced Energy Materials*, 8(20), 1800608.
- [54] Dréon, J. J. vd. (2020). 23.5%-efficient silicon heterojunction silicon solar cell using molybdenum oxide as hole selective contact. *Nanomater. Energy*(70), 104495.
- [55] Yang, X. vd. (2020). A highly conductive titanium oxynitride electron-selective contact for efficient photovoltaic devices. *Adv. Mater.*, 32(32), e2002608.
- [56] Hu, J. vd. (2011). Metal/III-V effective barrier height tuning using atomic layer deposition of high-k/high-k bilayer interfaces. *Appl. Phys. Lett.*(99), 092107.
- [57] Frank, M. M. vd. (2005). HfO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate dielectrics on GaAs grown by atomic layer deposition. *Appl. Phys. Lett.*(86), 152904.
- [58] Lucero, A. T. vd. (2016). Formation of a ZnO/ZnS interface passivation layer on (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S treated In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As: electrical and in-situ X-ray photoelectron spectroscopy charecterization. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55(8S2), 08PC02.
- [59] Lin, S. vd(2015). Interface designed MoS<sub>2</sub>/GaAs heterostrcture solar cell with sandwich stacked hexagonal boron nitride. *Science Report*(5), 15103.
- [60] Raj, V. vd. (2019). Introduction of TiO<sub>2</sub> in CuI for its improved performance as a p-type transparent conductor. *ACS App. Mater. Interfaces*, 11(27), s. 24254-24263.
- [61] Wang, Z. vd. (2018). Modulation-doped ZnO as high performance electron-selective layer for efficient silicon heterojunction solar cells. *Nanomater. Energy*(54), s. 99-105.
- [62] Chen, S. vd. (2012). Metal oxides for interface engineering in polymer solar cells. *Journal of Mater. Chem.*, 22(46), 24202.
- [63] Tian, J. vd. (2013). Architected ZnO photoelectrode for high efficiency quantum dot sensitized solar cells. *Energy Environ. Sci.*, 6(12), 3542.

- [64] Fei, C. vd. (2014). Improved charge generation and collection in dye-sensitized solar cells with modified photoanode surface. *Nanomater. Energy*, 10, s. 353-362.
- [65] Hussain, B. (2017). Improvement in open circuit voltage of n-ZnO/p-Si solar cell by using amorphous-ZnO at the interface. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 25(11), s. 919-917.
- [66] De Wolf, S. vd. (2012). High-efficiency silicon heterojunction solar cells:a review. *Green*, 2(1).
- [67] Haschke, J. vd. (2018). Silicon heterojunction solar cells:recent technological development and practical aspects-from lab to industry. *Solar Energy Mater. Sol. Cell.*(187), s. 140-153.
- [68] Pham, D. P. vd. (2021). Potential high efficiency of GaAs solar cell with heterojunction carrier selective contact layers. *Physica B: Phys. of Cond. Matt.*(611), 412856.
- [69] Tournet, J. vd. (2021). Narrow-bandgap InGaAsP Solar Cell with TiO<sub>2</sub> Carrier-Selective Contact. *Phys. Status Solidi RRL*, 2100282.
- [70] Pande, K. P., Manikopoulos, C. N. (1981). ZnO.p-InP heterojunction solar cells. *Solar Cells*(4), s. 147-152.
- [71] Nian, Q. vd. (2015). Pulse laser deposition fabricated InP/Al-ZnO heterojunction solar cells with efficiency enhanced by an i-ZnO interlayer. *Applied Physics A*(121), s. 1219-1226.
- [72] Montgomery, K. H. vd. (2014). Development of ZnO-InP heterojunction solar cells for thin film photovoltaics. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, s. 0524-0527.
- [73] Narangari, P. R. vd. (2019). Ultrathin Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> electron-selective contacts for high efficiency InP solar cells. *Nanoscale*(11), s. 7497-7505.
- [74] Yin, X. vd. (2014). 19.2% Efficient InP Heterojunction Solar Cell with Electron-Selective TiO<sub>2</sub> Contact. *ACS Photonics*(1), s. 1245-1250.
- [75] Caban, P. vd. (2018). ZnO/GaAs heterojunction solar cells fabricated by the ALD method. *Optik*(157), s. 743-749.
- [76] Pham, D. L. vd. (2021). Wide-gap ZnO layer as electron-selective front contact for single-junction GaAs solar cells. *Mater. Sci. in Semicon. Proc.*(121), 105344.

- [77] Shine, G., Saraswat, K. C. (2013). Limits of specific contact resistivity to Si, Ge and III-V semiconductors using interfacial layers. *2013 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, s. 69-72.
- [78] Hasegawa, H., Akazawa, M. (2008). Surface passivation technology for III-V semiconductor nanoelectronics. *Appl. Surf. Sci.*(255), s. 628-632.
- [79] Burgelman, M., Nollet, P., & Degraeve, S. (2000). Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. *Thin solid films*, 361, 527-532.
- [80] Alam, I. vd. (2021). Numerical simulation of Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub>-based perovskite solar cell with ZnO nanorod and P3HT as the charge transport layers. *Physica B: Physics of Condensed Matter.*, 618(413187).
- [81] Kumar, A. Thakur, A. D. (2018). Role of contact work function, back surface field, and conduction band offset in Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cell. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(08RC05).
- [82] Raj, V. vd. (2018). Indium phosphide based solar cell using ultra-thin ZnO as an electron selective layer. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(395301).
- [83] Vallisree, S. vd. (2019). Modelling, simulation, optimization of Si/ZnO and Si/ZnMgO heterojunction solar cells. *Materials Research Express*, 6(2).
- [84] Bourbara, H. vd. (2019). Optimization of the performance of GaAs solar cells: effect of the window layer. *Journal of Ovonic Research*, 15(3), s. 151-156.
- [85] Gan, Y. vd. (2020). Numerical Investigation energy conversion performance of tin-based perovskite solar cells using cell capacitance simulator. *Energies*, 13(5907).
- [86] Patel, P. K. (2021). Device simulation of highly efficient eco-friendly CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnI<sub>3</sub> perovskite solar cell. *Nature: Scientific Reports*, 11(3082).
- [87] Mouchou, R. T. vd. (2021). numerical Simulation and optimization of p-NiO/n-TiO<sub>2</sub> solar cell system using SCAPS. *Materials Today: Proceedings*(38), s. 835-841.
- [88] Al-Hattaba, M. vd. (2021). Numerical simulation of a new heterostructure CIGS/GaSe solar cell system using SCAPS-1D software. *Solar Energy Volume*(227), s. 13-22.

- [89] Ioffe (2023). *New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties*. Ioffe Physico-Technical Institute: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAs/> adresinden alındı. (Erişim tarihi: 30.05.2024).
- [90] Sotoodeh, M., Khalid, A. H., & Rezazadeh, A. A. (2000). Empirical low-field mobility model for III–V compounds applicable in device simulation codes. *Journal of Applied Physics*, 87(6), 2890-2900.
- [91] *Spectral Reflectance Calculator* (2024). <https://www.filmetrics.com/reflectance-calculator> adresinden alındı. (Erişim tarihi: 02.06.2024)
- [92] Kelly, P., Arnell, R. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and. *Vacuum*(56), s. 156-172.
- [93] Singh, J., Wolfe, D. (2005). Review Nano and macro-structured component fabrication by electron beam-physical vapor deposition (EP-PVD). *Journal of Materials Science*(40), s. 1-26.
- [94] Schroder, D. K. (2005). *Semiconductor material and device characterization (3rd edition)*. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons.
- [95] Li, X. vd. (1989). High-Efficiency Indium Tin Oxide/Indium Phosphide Solar Cells. *Applied Phys. Lett.*, 54(26), s. 2674-2676.

## ÖZGEÇMİŞ

**ORCID NO:** 0000-0001-8607-6011

**Ad Soyad** : Elif YILMAZ

**Yabancı Dil** : İngilizce

**Doğum Yeri ve Yılı** :

**E-Posta** :

### Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2010, Lisans, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fak., Çevre Müh. Bölümü
- 2016, Yüksek Lisans, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD
- 2016- 2018, Çevre ve İş Güvenliği Uzmanı, Eczacıbaşı Yapı Ürünleri Grubu ARTEMA

### Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Ergürhan, A.A., Şenel, O., Yılmaz, E., Arpapay, B., Kulakcı, M. and Serincan, U. Effect of tilt angle and drying temperature on the surface coverage rate of polystyrene nanospheres in evaporation-driven self-assembly process, Journal of Micro/Nanopatterning, Materials and Metrology, 2024, Vol. 23(1)
- Ergürhan, A.A., Şenel, O., Zaimler, E., Arpapay, B., Kulakcı, M. ve Serincan, U. Düzenli ve Düzensiz Desenlenmiş Si Alttaş Üzerine MBE Yöntemi ile GaInP Güneş Hücresi Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, Konferans Bildirisi, Fotonik 2022, Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara, 2022
- Turgut E.T., Cavcar M., Yay O.D., Uçarsu M., Yılmaz E., Usanmaz Ö., Armutlu K., Döğeroğlu T., Mıake Lye R.C, (2015). Analysis of Test-cell Emission Measurements of Newly Overhauled Turbofan Engines, Journal of Propulsion and Power, 31(2), 559-572

- Turgut E.T., Cavcar M., Yay O.D., Uçarsu M., Yılmaz E., Usanmaz Ö., Armutlu K., Döğeroğlu T. (2015). A gaseous emissions analysis of commercial aircraft engines during test-cell run, Atmospheric Environment, 116, 102-111
- Yılmaz, E., Yay, O.D., Turgut, E.T., Uçarsu, M., Armutlu, K., Döğeroğlu, T. (2014), CFM56-7B24 Series Aircraft Engine Emission Measurements in Testcell Environment and Emission Index Development, 16th GEIA Conference-Bridging Emissions Science and Policy 10-11 June, Boulder, Colorado, USA
- Yılmaz, E., Yay, O.D. (2013). Analysis of the Uncertainty Arising from the Mixing Height in Aircraft Emissions Estimated According to ICAO Definitions, International 5th Air Pollution and Control Symposium, 18-20 Eylül 2013, Eskişehir/Türkiye

#### **Ödülleri:**

- En İyi Poster Sunumu 2.lik Ödülü, EsTekFest Eskişehir, 2023.  
Yılmaz, E., Şenel, O., Kulakcı, M. ve Serincan, U. Esnek İnce Film GaInP Güneş Hücrelerinin Düzenli ve Düzensiz Desenlenmiş Si Alttaş Üzerinden Geliştirilmesi