

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI/TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**KRİSTAL SİLİSYUM GÜNEŞ HÜCRELERİ UYGULAMALARI İÇİN HAFNİYUM  
DİOKSİT (HfO<sub>2</sub>) TABANLI YANSIMA ÖNLEYİCİ VE PASİVASYON ETKİLİ  
KATMANLARIN GELİŞTİRİLMESİ**

**İmran KANMAZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“DOKTOR (YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI/TEKNOLOJİLERİ)”**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 06 / 2021**

**Tezin Savunma Tarihi : 05 / 08 / 2021**

**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ÜZÜM**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Doktora tezi olarak K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teslim edilen bu çalışmada; Kristal Silisyum Güneş Hücreleri Uygulamaları için Hafniyum Dioksit (HfO<sub>2</sub>) Tabanlı Yansıma Önleyici ve Pasivasyon Etkili Katmanların Geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapıldı.

Çalışmalarımın her aşamasında desteğini ve yardımını esirgemeyip bana rehberlik eden sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ÜZÜM'e şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitesi üyeliği görevini üstlenen ve görüşlerine başvurduğum sayın Prof. Dr. Emin BACAKSIZ ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ'ye tezime sundukları katkılardan dolayı teşekkür ederim. Ayrıca Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU ve Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her türlü imkânı sağlayan Fizik Bölüm Başkanlığına, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri Anabilim dalı Bölüm Başkanlığına ve emeği geçen bütün hocalarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bana yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Zekeriya KARAAHMET'e ve Al Montazer MANDONG'a teşekkür ederim.

“1002 Hızlı Destek” kapsamında 119F063 numaralı proje ile beni maddi açıdan desteklemesinden dolayı TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) teşekkürü bir borç bilirim. Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne 8651 numaralı (BAP) proje ile desteklediklerinden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca “YÖK 100/2000” Projesi kapsamında Türkiye'nin öncelikli alanlarından biri olan “Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri” alanında doktora yaptığım sürece verdikleri burstan dolayı Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK)'na teşekkür ederim.

Bu zamana kadar hiçbir desteğini benden esirgemeyen başta eşim olmak üzere bütün aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İmran KANMAZ

Trabzon-2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kristal Silisyum Güneş Hücreleri Uygulamaları için Hafniyum Dioksit (HfO<sub>2</sub>) Tabanlı Yansıma Önleyici ve Pasivasyon Etkili Katmanların Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ÜZÜM'ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metin içerisinde ve referanslarda eksiksiz şekilde belirttiğimi, tez çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak hareket ettiğimi ve aksi durumun ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/08/2021

İmran KANMAZ

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Dünyadaki Enerji İhtiyacı ve Sürdürülebilirliği.....	6
1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	7
1.4. Fotovoltaik Güneş Hücreleri ve Tarihçesi .....	8
1.5. Fotovoltaik Güneş Hücresi Parametreleri .....	9
1.5.1. Kısa Devre Akımı.....	10
1.5.2. Açık Devre Voltajı .....	10
1.5.3. Doldurma Faktörü (Doluluk Oranı).....	11
1.5.4. Verim .....	11
1.5.5. Seri Direnç.....	12
1.5.6. Paralel Direnç.....	12
1.6. P-N Ekleme.....	12
1.7. Kristal Silisyum Tabanlı Güneş Hücreleri .....	14
1.8. Güneş Hücrelerindeki Optik Kayıplar .....	15
1.9. Yansıma (R) .....	15
1.9.1. Speküler Yansıma.....	16
1.9.2. Difüz Yansıma.....	16
1.10. Yansıma Önleyici Kaplamalar.....	17
1.10.1. Tek Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar .....	19
1.10.2. İki Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar.....	21
1.10.3. Çok Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar.....	22
1.11. Fresnel Denklemleri .....	24
1.11.1. Işık Dalgasının s-Kutuplanması.....	26
1.11.2. Işık Dalgasının p-Kutuplanması .....	27
1.12. Transfer Matris Metodu.....	28
1.13. Yarıiletkenlerde Rekombinasyon ve Yüzey Pasivasyonu.....	34
1.13.1. Işımalı Rekombinasyon .....	35

1.13.2. Auger Rekombinasyonu .....	35
1.13.3. Shockley-Read Hall Rekombinasyonu (SRH) .....	35
1.13.4. Yaşam Süresi .....	36
1.14. Pasivasyon .....	36
1.14.1. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Azaltılması .....	37
1.14.2. Yük Taşıyıcılarının Yüzey Yoğunluğunun Azaltılması .....	38
1.15. Arka Yüzey Alanı (BSF) .....	39
2. MATERYAL VE YÖNTEM .....	42
2.1. Numune Hazırlama ve Karakterize Etmede Kullanılan Cihazlar .....	42
2.1.1. Dönel Kaplama .....	42
2.1.2. X-ışını Kırınımı (XRD) Ölçümü .....	43
2.1.3. UV-Visible Spektrofotometre .....	45
2.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	45
2.1.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi .....	46
2.1.6. Yarı Kararlı Foto İletkenliği (QSSPC) .....	47
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	50
3.1. HfO <sub>2</sub> İnce Filmlerin Yansıma Önleyici Olarak İncelenmesi .....	50
3.2. Tek katmanlı HfO <sub>2</sub> Yansıma Önleyici Kaplama .....	51
3.2.1. HfO <sub>2</sub> İnce Filmler – Düşük Molarite .....	51
3.2.2. HfO <sub>2</sub> İnce Filmler – Yüksek Molarite .....	56
3.2.3. HfO <sub>2</sub> İnce Filmleri Üzerinde Yaşlanmanın Etkisi .....	65
3.2.4. SiO <sub>2</sub> Tek Katmanlı Yansımayı Önleyici Katmanlar .....	66
3.3. Çift Katmanlı HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Yansıma Önleyici Kaplama .....	71
3.4. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> Karışımları ile Oluşturulan Yansıma Önleyici Kaplamalar .....	74
3.5. SiO <sub>2</sub> Nanopartikül Katkısının HfO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> ve HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) Solüsyonları Üzerindeki Etkisi .....	81
3.6. HfO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ve SiO <sub>2</sub> Nprt Katkılı İnce Filmlerinin Pasivasyon Etkisi .....	86
3.7. Geliştirilen Katmanların Güneş Hücrelerine Uygulanması ve Simülasyonu .....	92
3.7.1. BSF Katmanının Kalınlık ve Katkı Konsantrasyonunun Optimizasyonu .....	93
3.7.2. BSF Katmanı İçin Optimum Al Miktarı ve Tavlama Sıcaklığının Belirlenmesi .....	97
3.7.3. HfO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ve SiO <sub>2</sub> Nprt Katkılı İnce Filmlerinin C-Si Güneş Hücrelerine Yansıma Önleyici Kaplama Olarak Uygulanması .....	99
4. SONUÇ .....	101
5. ÖNERİLER .....	104
6. KAYNAKLAR .....	105
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

KRİSTAL SİLİSYUM GÜNEŞ HÜCRELERİ UYGULAMALARI İÇİN HAFNİYUM  
DİOKSİT (HfO<sub>2</sub>) TABANLI YANSIMA ÖNLEYİCİ VE PASİVASYON ETKİLİ  
KATMANLARIN GELİŞTİRİLMESİ

İmran KANMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdullah ÜZÜM  
2021,114 Sayfa

Bu çalışmada dönele kaplama yöntemi kullanılarak hafniyum oksit (HfO<sub>2</sub>) temelli ince filmler oluşturularak yansımaya önleyici ve pasivasyon etkileri araştırıldı. İlk olarak HfO<sub>2</sub> ince filmi c-Si yüzeyine kaplandıktan sonra tavlama sıcaklığının etkisini görmek için numuneler 500°C ile 1000°C aralığında tavlandı. XRD sonuçlarına göre 500°C'nin üzerindeki tavlama sıcaklıklarında filmlerin monoklinik fazda kristalleştiği görüldü. Yansımaya ölçümlerinden, 700°C'de tavlama sonrası 71.36 nm kalınlığındaki HfO<sub>2</sub> film ile ortalama %10.87 yansıtma elde edildi. Ayrıca elipsometre ölçümleri sonucunda, filmlerin 600 nm'de 1.934'lik kırılma indisine sahip olduğu ve tavlama sıcaklığının 800°C'ye yükselmesi durumunda kırılma indisinin 2.05 yükseldiği görüldü. Daha sonra çift katmanlı ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ince filmler elde etmek için SiO<sub>2</sub> ince film optimizasyonu gerçekleştirildi. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) filmleri büyütülerek yansımaya önleyici ve pasivasyon etkileri araştırıldı. Hazırlanan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filmlerine ait minimum ve ortalama yansımaya değerleri sırasıyla %4.30 ve %14.68 olarak elde edildi. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) filmlerine ait efektif taşıyıcı yaşam süreleri, 600°C'de tavlandıktan sonra 2 µs'lik kaplanmamış silisyumun taşıyıcı yaşam süresine kıyasla 32 µs'ye yükseldiği görüldü. Daha yüksek tavlama sıcaklıklarda taşıyıcı yaşam süresinin önemli ölçüde bozulduğu (700°C ve 800°C için sırasıyla 8.9 ve 0.6 µs'ye kadar) görüldü. Son olarak deneysel ortalama yansımaya değerlerinin Afors-Het yazılımıyla c-Si güneş hücrelerine yansımaya önleyici (YÖ) katman olarak uygulanması sonucunda yansımaya önleyici kaplamasız güneş hücresinin güç dönüşüm verimi (PCE) %11.68 olarak belirlenirken, yüksek molariteli (0.4M) HfO<sub>2</sub> ile kaplanmış güneş hücresinin verimi %17.58 olarak elde edildi. Yüksek molariteli HfO<sub>2</sub> ince filminin uygulandığı güneş hücresi için kısa devre akım yoğunluğunun (J<sub>sc</sub>) 20.87'den 31.27 mA/cm<sup>2</sup>'ye ve açık devre voltajının (V<sub>oc</sub>) 685.10'dan 696.10 mV'ye yükseltilmesi sonucu yaklaşık olarak %6 verim artışı sağlandı.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Hücresi, HfO<sub>2</sub>, İnce film, Pasivasyon, Yansımaya Önleyici Kaplamalar

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF ANTI-REFLECTIVE AND PASSIATION LAYERS BASED ON  
HAFNIUM OXIDE (HfO<sub>2</sub>) FOR CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL  
APPLICATIONS

Karadeniz Technical University  
The School of Natural and Applied Sciences  
Renewable Energy Sources / Technologies Graduate Program  
Supervisor: Assist. Prof. Abdullah ÜZÜM  
2021,114 Pages

In this study, Hafnium oxide (HfO<sub>2</sub>) based thin films were produced by using spin-coating method and then their antireflection behavior and passivation effects were investigated. First, samples were annealed at 500 °C-1000 °C temperature range in order to observe the effect of annealing temperature on coating of hafnium oxide on c-Si. According to XRD results, it was observed that the samples annealed at temperature above 500 °C were crystallized as monoclinic phase. After annealing at 700 °C, 10.87% reflection acquired for 71.3 nm thick HfO<sub>2</sub> thin film as a result of reflection measurements. Furthermore, from ellipsometer measurements it was clearly observed that samples have 1.934 refractive index at 600 nm wavelength and refractive index increased to 2.05 by increasing annealing temperature to 800 °C. After that, SiO<sub>2</sub>-thin film optimization was carried out to produce double layered and HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> mixture thin films. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) thin films were produced and their antireflective and passivation effects were investigated. Minimum and average reflection values of HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) thin films were obtained as 4.30% and 14.68%, respectively. Effective carrier lifetime of HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) thin films after annealing at 600°C increased to 32 μs compared to un-coated silicon effective carrier lifetime which is 2 μs. For higher annealing temperatures, it has been seen that the effective carrier lifetime decreases dramatically (for annealing temperatures of 700°C and 800°C, effective carrier lifetime decreases to 8.9 μs and 0.6 μs, respectively). Finally, after application of average experimental reflection values as anti-reflection coating (ARC) by using Afors-Het software to c-Si solar cells, power conversion efficiencies (PCE) of solar cell without anti-reflection coating and high molarity (0.4M) HfO<sub>2</sub> coated solar cell were determined as 11.68% and 17.58%, respectively. As a result of increments in the short circuit current density (J<sub>sc</sub>) from 20.87 mA/cm<sup>2</sup> to 31.27 mA/cm<sup>2</sup> and in open circuit voltage (V<sub>oc</sub>) from 685.10 mV to 696.10 mV, 6% efficiency increase obtained for high molarity HfO<sub>2</sub> thin film coated solar cell.

**Keywords:** Anti Reflection Coating (ARC), HfO<sub>2</sub>, Passivation, Solar Cells, Thin Film



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. Güneş hücresi türleri .....	2
Şekil 2. Dünya enerji tüketim grafiği [22]. .....	6
Şekil 3. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen net elektrik üretiminin payı [22]. ..	7
Şekil 4. Güneş hücresi I-V ve P-V eğrisi.....	9
Şekil 5. P-n eklem diyotunun şematik gösterimi (○-boşluk, ●- elektron, ⊖-negatif iyon, ⊕-pozitif iyon) .....	13
Şekil 6. Güneş hücresinin aydınlanma altındaki enerji bant diyagramı [36].....	13
Şekil 7. Geleneksel p-tipi kristal silisyum güneş hücresinin yapısı .....	14
Şekil 8. Yansılardan dolayı optik kayıplar .....	15
Şekil 9. Pürüzsüz yüzeyden ışınların yansımaları .....	16
Şekil 10. Pürüzlü yüzeyden ışınların yansımaları .....	16
Şekil 11. Tek katmanlı yansıma önleyici kaplama .....	17
Şekil 12. Yansıma önleyici kaplamanın çalışma prensibi.....	18
Şekil 13. (a) Tek katmanlı, (b) iki katmanlı, (c) üç katmanlı YÖ tabakaların şematik gösterimi.....	18
Şekil 14. Tek katmanlı yansıma önleyici kaplama uygulanmış yüzeyden yansımalar .....	20
Şekil 15. Çok katmanlı yansıma önleyici uygulanmış yüzeyden ışınların yansımaları .....	23
Şekil 16. Yüzeğe gelen ışık dalgası ve düzlemi arasındaki ilişki.....	24
Şekil 17. Yüzeğe gelen ışık dalgasına ait sınırdaki alanlar .....	29
Şekil 18. Güneş hücrelerindeki (a) Işımalı (b) Auger ve (c) Shokley-Read-Hall rekombinasyon mekanizmaları.....	34
Şekil 19. Al-alaşımli BSF'ye sahip tipik bir p-tipi c-Si güneş hücresinin şematik gösterimi (a), BSF'nin enerji bantı diyagramı (b) .....	39
Şekil 20. Eşzamanlı tavlama işlemi için sıcaklık profili .....	40
Şekil 21. Dönel kaplama tekniği şematik gösterimi .....	42
Şekil 22. Bragg yasasının geometrik gösterimi .....	43
Şekil 23. XRD ölçüm cihazı.....	44
Şekil 24. UV-visible spektrofotometre cihazı.....	45
Şekil 25. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	46
Şekil 26. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) cihazı .....	47
Şekil 27. Taşıyıcı yaşam süresini ölçmek için endüktif olarak bağlanmış foto iletkenlik aparatının şeması [94].....	48
Şekil 28. 0.05M solüsyon ile hazırlanmış HfO <sub>2</sub> ince filmlerle kaplı silisyum yüzeylerin farklı sıcaklıklarda tavlandıktan sonraki yansıma grafikleri .....	51

Şekil 29. 0.05M solüsyon ile hazırlanmış HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin XRD grafiği .....	52
Şekil 30. 900°C farklı sürelerde tavllanmış 0.05M HfO <sub>2</sub> solüsyonu ile kaplı silisyum yüzeylerin yansıma grafikleri .....	53
Şekil 31. Dönel kaplama hızına bağlı olarak ölçülmüş yansıma grafikleri .....	54
Şekil 32. 0.05M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma grafikleri .....	55
Şekil 33. 0.05M HfO <sub>2</sub> solüsyonu ile parlak düz (a-c) ve tekstüre (d-f) silisyum üzerine kaplanmış ve tavllanmış ince filmlerin SEM görüntüsü .....	56
Şekil 34. Farklı molaritede hafniyum içeren solüsyonlarla kaplanmış silisyum yüzeyinin yansıma grafikleri .....	57
Şekil 35. HfO <sub>2</sub> ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı XRD grafiği .....	58
Şekil 36. HfO <sub>2</sub> ince film kaplı silisyum yüzeyinin tavlama sıcaklığına(a) ve 700°C de tavlama süresine(b) bağlı yansıma grafikleri .....	59
Şekil 37. Dönel kaplama hızına bağlı olarak ölçülen ve hesaplanan yansıma grafiklerinin yalın silisyum yüzeyi ile karşılaştırılması .....	60
Şekil 38. Kırınım indisinin, gözeneklilik ve paketleme yoğunluğu üzerinde tavlama sıcaklığının etkisi .....	61
Şekil 39. 0.4M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma grafikleri .....	62
Şekil 40. Parlak yüzeyli silisyum alttaş üzerine (a-c) ve tekstüre edilmiş silisyum alttaş üzerine (d-f) kaplanmış HfO <sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüsü .....	63
Şekil 41. Farklı molaritelerde hazırlanmış ince filmlerin SEM görüntüleri (x20k) .....	64
Şekil 42. Tekstüre yüzeyli silisyum alttaş üzerine farklı dönel kaplama işlemleri ile kaplanmış ve optimum şartlarda tavllanmış HfO <sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüsü .....	64
Şekil 43. 0.4M HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin yaşlanmaya bağlı yansıma grafikleri .....	65
Şekil 44. SiO <sub>2</sub> solüsyon miktarına bağlı yansıma grafikleri .....	66
Şekil 45. SiO <sub>2</sub> ile kaplanmış silisyum yüzeyindeki yansımanın tavlama sıcaklığına bağlı değişimi .....	67
Şekil 46. SiO <sub>2</sub> ince filmlerine ait XRD deseni .....	68
Şekil 47. SiO <sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama süresine bağlı yansıma grafikleri .....	69
Şekil 48. Seyreltilmiş solüsyon uygulandığında elde edilen SiO <sub>2</sub> kaplı silisyum yüzeyi yansıma grafikleri .....	70
Şekil 49. SiO <sub>2</sub> ince filmlerin SEM ölçümleri .....	71
Şekil 50. Çift katman YÖ kaplama için SiO <sub>2</sub> solüsyon miktarına bağlı yansıma grafikleri .....	72
Şekil 51. SiO <sub>2</sub> Solüsyonunun seyreltmeye bağlı çift katman yansıma grafikleri .....	73
Şekil 52. HfO <sub>2</sub> ve SiO <sub>2</sub> solüsyonlarının farklı oranlarda karıştırılması ile oluşan yansıma grafikleri .....	75
Şekil 53. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı yansıma grafikleri .....	76
Şekil 54. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> karışımı ince filmlerin tavlama süresine bağlı yansıma grafikleri .....	77

Şekil 55. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin kaplama hızına bağlı yansıma grafikleri .....	78
Şekil 56. HfO <sub>2</sub> : SiO <sub>2</sub> (1:1) çözeltisi ile kaplanmış düz (a-b) ve tekstüre .....	80
Şekil 57. Hf, O ve Si dağılımını gösteren EDAX görüntüleri.....	80
Şekil 58. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı SiO <sub>2</sub> ince filmlerin katkılama oranına bağlı reflektans grafiği .....	81
Şekil 59. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı SiO <sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüleri.....	82
Şekil 60. SiO <sub>2</sub> Nprt Katkılı SiO <sub>2</sub> İnce Filmlerinin Enerji Dağılım X-Işını Analizi (EDAX) Spektrumu.....	83
Şekil 61. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> karışımı ince filmlerin katkılama oranına bağlı reflektans grafiği .....	84
Şekil 62. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüleri .....	85
Şekil 63. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> ince filmlerinin enerji dağılım X-Işını analizi (EDAX) spektrumu .....	85
Şekil 64. HfO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1), SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (5:1) ve HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (40:1) optimum solüsyonları için efektif taşıyıcı yaşam sürelerine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğu (a) ve iVoc Değerleri (b) grafiği.....	87
Şekil 65. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ince filminin farklı tavlama sıcaklıklarındaki efektif taşıyıcı yaşam sürelerine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğu (a) ve örneklerin İVoc değerleri (b) grafiği ...	88
Şekil 66. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ince filmine efektif taşıyıcı yaşam süreleri ve bunlara karşılık gelen yüzey rekombinasyon hızlarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 67. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin 600°C, 700°C ve 800°C'de tavllanmış FTIR soğurma spektrumları.....	90
Şekil 68. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin 600°C, 700°C ve 800°C'de tavllanmış XRD grafiği .....	91
Şekil 69. BSF kalınlığına bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri.....	94
Şekil 70. BSF katkı konsantrasyonuna bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri .....	95
Şekil 71. Tepe tavlama sıcaklığı ve Al miktarına bağlı BSF kalınlığı .....	97
Şekil 72. Kaplamasız ve HfO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ve SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı ince film kaplı güneş hücrelerinin I-V grafiği .....	99

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Güneş hücresi verim değerleri [5]. .....	8
Tablo 2. Güneş hücresi için kullanılan yansımaya önleyici kaplamaların kırılma indisleri [39]. .....	19
Tablo 3. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış 0.05M solüsyonla kaplı silisyum altlıklarının yansımaya değerleri .....	52
Tablo 4. 900°C farklı sürelerde tavllanmış 0.05M solüsyonla kaplı silisyum altlıklarının yansımaya değerleri .....	53
Tablo 5. Dönel kaplama hızına bağlı olarak yansımaya değerleri .....	55
Tablo 6. 0.05M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin yansımaya değerleri .....	56
Tablo 7. Molariteye bağlı olarak yansımaya değerleri .....	57
Tablo 8. Tavlama sıcaklığı ve süresi değişimine bağlı olarak elde edilen yansımaya değerleri .....	59
Tablo 9. 0.4M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO <sub>2</sub> ince filmlerinin yansımaya değerleri .....	63
Tablo 10. SiO <sub>2</sub> solüsyonu miktarına bağlı minimum ve ortalama yansımaya değerleri .....	67
Tablo 11. SiO <sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama sıcaklığına bağlı yansımaya değerleri .....	68
Tablo 12. SiO <sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama süresine bağlı yansımaya değerleri .....	69
Tablo 13. Tek katman ve çift katman ortalama ve minimum yansımaya değerleri .....	72
Tablo 14. Tek katman ve çift katman ortalama ve minimum yansımaya değerleri .....	73
Tablo 15. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> solüsyonlarının farklı oranlarda karıştırılması ile oluşan yansımaya değerleri ..	75
Tablo 16. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı yansımaya değerleri .....	77
Tablo 17. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin tavlama süresine bağlı yansımaya değerleri .....	78
Tablo 18. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin kaplama hızına bağlı yansımaya değerleri .....	79
Tablo 19. Düz ve tekstüre silisyum yüzeyindeki filmlerin ağırlıkça yüzdelik oranı .....	80
Tablo 20. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı SiO <sub>2</sub> ince filmlerin katkılama oranına bağlı yansımaya değerleri .....	82
Tablo 21. SiO <sub>2</sub> Nprt katkılı HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> karışımı ince filmlerin katkılama oranına bağlı ortalama ve minimum reflektans değerleri .....	84
Tablo 22. HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1) ince filminin tavlama sıcaklığına bağlı efektif taşıyıcı yaşam süreleri ve bunlara karşılık gelen difüzyon uzunluğu ile numunelerin yüzey rekombinasyon hızları ..	89
Tablo 23. Afors-Het yazılımında kullanılan bazı güneş hücresi başlangıç parametreleri .....	93
Tablo 24. BSF kalınlığına bağlı c-Si güneş hücresi elektriksel karakteristikleri .....	94
Tablo 25. BSF katkı konsantrasyonuna bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri .....	96
Tablo 26. Optimum BSF'li güneş hücresi parametrelerinin BSF'siz güneş hücresi parametreleriyle karşılaştırılması. ....	97

Tablo 27. BSF kalınlığının tepe tavlama sıcaklığı ve Al macunu miktarına bağımlılığı.....98

Tablo 28. Kaplamasız ve HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince film kaplı güneş hücresi karakteristikleri.....100



## SEMBOLLER DİZİNİ

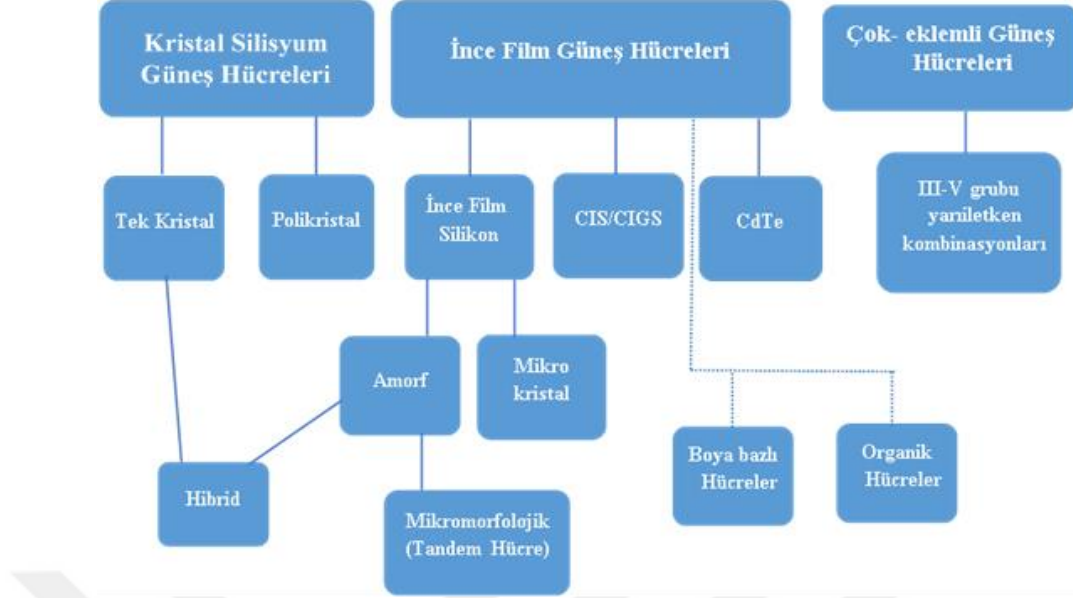
Å	: Angstrom
AC	: Alternatif akım
d	: Düzlemler arası mesafe
DC	: Doğru akım
dk	: Dakika
$E_c$	: İletkenlik bandı
EDS	: Enerji dağılım X-ışını spektrometresi
$E_f$	: Fermi enerji seviyesi
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$E_v$	: Valans bandı
FF	: Fill faktör
FTIR	: Dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
h $\nu$	: Foton enerjisi
I	: Akım
$I_{max}$	: Maksimum akım
$I_{min}$	: Minimum akım
IR	: Kızılötesi
$I_{sc}$	: Kısa devre akımı
K	: Kelvin
L	: Uzunluk
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
N	: Azot
n	: Kırılma indisi
nm	: Nanometre
$P_{max}$	: Maksimum güç
PV	: Fotovoltaik
r	: Yansıma katsayısı
R	: Yansıma
$R_p$	: Paralel direnç
$R_s$	: Seri direnç
$S_{eff}$	: Yüzey rekombinasyon hızı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
T	: Geçirgenlik
t	: Geçirgenlik katsayısı
TE	: Transverse elektrik
TM	: Transverse manyetik
$V_{oc}$	: Açık devre gerilimi
XRD	: X-ışını kırınımı
YÖ	: Yansıma önleyici
$\eta$	: Verim
$\lambda$	: Dalga boyu
$\mu l$	: Mikrolitre
$\mu m$	: Mikrometre
$\rho$	: Özdirenç
$\tau_{eff}$	: Taşıyıcı yaşam süresi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Artan enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir olması belki de 21. yüzyılın en önemli zorluklarından biridir. Mevcut enerji kaynakları, karbon temelli fosil yakıtlardan üretilmektedir. Günümüz fosil yakıt kullanım oranına göre kömür, gaz ve petrol ürünlerinin sırasıyla 107, 37 ve 35 yıl içinde tükeneceği tahmin edilmektedir [1]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları, insan nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte artan enerji ihtiyacından dolayı geçmişten günümüze kadar oldukça önem kazanmıştır. Fosil yakıtların azalması en nihayetinde tükenen olması ve çevreyi kirleterek insan sağlığını olumsuz etkilemesi insanları alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Son zamanlarda bütün dünyada olduğu gibi Türkiye’de de yenilenebilir enerjiye olan ilgi artmış ve bu alanda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Türkiye’nin 2019 yılına ait yenilenebilir enerji gücü yaklaşık 42 GW iken bu değer 2024 yılına kadar %50 artarak 63 GW’a ulaşması beklenmektedir [2]. Bu kurulu gücün büyük çoğunluğunu hidroelektrik enerji oluşturmaktadır. Ancak güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları yıllar içerisinde artmasına ve birçok konuda istenilen seviyeye ulaşılmasına rağmen henüz uygun maliyet konusunda istenilen aşamaya ulaşamamıştır.

Yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir [3]. Güneş enerjisi, geleneksel fosil yakıt enerjisine en önemli alternatif enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisi tamamen doğal olduğundan, aynı zamanda temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [4]. Bunun yanında tükenmeyen bir enerji kaynağı olması güneş enerjisinin bir diğer avantajıdır. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen aygıtlar olarak tanımlayabileceğimiz güneş hücreleri, yarı iletken malzemelere bağlı yapılar olup Şekil 1 de görüldüğü gibi çeşitli türleri mevcuttur. Bunlar genel olarak; tek kristalli silisyum güneş hücreleri, çok kristalli silisyum güneş hücreleri, ince film güneş hücreleri, amorf silisyum güneş hücreleri, kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücreleri, bakır indiyum galyum selenid (CIGS) güneş hücreleri, perovskite temelli güneş hücreleri ve boya duyarlı güneş hücreleri olmak üzere birçok çeşidi mevcuttur.



Şekil 1. Güneş hücresi türleri

Şimdiye kadar Bakır indiyum galyum selenid (CIGS) güneş hücrelerinde %23.35, kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücrelerinde %21, amorf silisyum güneş hücrelerinde %11.90, perovskite temelli güneş hücrelerinde %21.60, boya duyarlı güneş hücrelerinde %11.90, tek kristalli silisyum güneş hücrelerinde %26.70 ve çok kristalli silisyum güneş hücrelerinde %23.20 verim elde edilmiştir [5].

Fotovoltaik güneş hücrelerinin mevcut enerji kaynaklarıyla rekabet edebilmesi için maliyetinin uygun ve veriminin yüksek olması gerekmektedir [6]. Her bir güneş hücresindeki dönüşüm verimliliğini arttırmak için yüzeyin tekstüre (yüzey dalgalandırma) edilmesi, yüzeye yakın yük taşıyıcılarının kontrol edilmesi (pasivasyon) ve güneş hücresi üzerine kaplanan YÖ kaplamalar gibi uygulamalar büyük önem arz etmektedir. Literatüre baktığımızda dönel kaplama ve spreylendirme ile yapılmış birçok çalışma vardır. Sol-gel metoduyla yapılan bir çalışmada J. Wang ve arkadaşları altı katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  ve üç katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2\text{-SnO}_2$  optik ince filmleri araştırmıştır. Tasarlanan altı katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  ve üç katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2\text{-SnO}_2$  ince filmleri için sırasıyla %98.20 ve %98.60 geçirgenlik elde etmişlerdir (400-700 nm). Elde edilen bu verilerden sol-gel'in YÖ kaplamalar için büyük avantajlara sahip olduğunun sonucuna varmışlardır [7]. P. Vitanov ve arkadaşları tarafından  $\text{Al}_2\text{O}_3$  filmleri sol-gel yöntemi kullanılarak silisyum altlıklar üzerine kaplanıp filmlerin dielektrik özellikleri üzerinde tavlama sıcaklığının etkisini araştırılmıştır. Oluşturulan katmanlar, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi ve Taramalı Elektron Spektroskopisi ile incelenmiş ve elektriksel ölçümleri metal-yalıtkan-yarı iletken (MIS)



yapıları üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen C-V eğrileri, 750°C'de tavlama sıcaklığı için arayüzey durum yoğunluğunun ( $D_{it}$ ),  $3.7 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  sabit bir değer olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak kimyasal kaplama ile hazırlanan ve 750°C'de tavllanmış  $\text{Al}_2\text{O}_3$  filmleri, diğer kaplama yöntemlerine nispeten daha iyi elektrik özellikler sergilemiştir. MIS yapıları üzerine yaptıkları araştırmada ise dielektrik tabakanın nispeten yüksek geçirgenliğe, düşük arayüzey yoğunluğuna ve düşük sızıntı akımına sahip olduğunu göstermişlerdir [8]. Diğer bir çalışmada S.-Y. Lien ve arkadaşları sol-gel yöntemini kullanarak tekstüre edilmemiş monokristal Si güneş hücreleri için tek katmanlı  $\text{TiO}_2$ , çift katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  ve üç katmanlı  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{TiO}_2$  YÖ kaplamalar hazırlamışlardır ve ortalama optik yansımaya (400-1000 nm), tek katmanlı, çift katmanlı ve üç katmanlı YÖ kaplamalar için sırasıyla yaklaşık olarak %9.30, %6.20 ve %3.20 olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak teorik ve deneysel sonuçlar arasında çok iyi bir uyum ve üç katmanlı YÖ kaplamalarda Si güneş hücresinin veriminde %39'luk bir iyileşme olduğunu göstermiş ve sol-gel yönteminin YÖ kaplama işleminde düşük maliyetli güneş hücresi üretimi için yüksek potansiyele sahip olduğunun sonucuna varmışlardır [9]. D. Mahadik ve arkadaşları tarafından yine solüsyon tabanlı  $\text{SiO}_2$  ile yapılan çalışmada, temizlenmiş cam altlık üzerine daldırılmalı kaplama yöntemi ile kaplanarak 400°C'de tavlınmıştır. Temizlenmiş cam altlık üzerine optimize edilmiş tek tabakalı  $\text{SiO}_2$  kaplaması,  $\lambda=500$  nm dalga boyunda maksimum %97.50 geçirgenlik elde edilmiştir. Ayrıca bu işlem güneş hücrelerinin verimliliğini arttırmak ve büyük bir potansiyele sahip olan YÖ kaplama hazırlanması için basit ve uygun maliyetli bir yöntem sunmaktadır [10].

Daldırılmalı (dip coating) kaplama yöntemini kullanan W. Zhang ve arkadaşları, cam altlık üzerine  $\text{SiO}_2$ 'yi kapladıktan sonra kaliteyi arttırmak için kaplamayı 450°C'de 1 saat boyunca tavlamışlardır. Optimize edilmiş bir katalizör ve film kalınlığı kullanılarak, kaplanmış soda-kireç camının optik geçirgenliği %5'ten fazla arttırılabilir. Optimize edilmiş tek katmanlı  $\text{SiO}_2$  kaplamaları soda-kireç camı altlıklarında, 300 ile 1300 nm dalga boyu aralığında ortalama %95'lik bir geçirgenlik değeri elde etmişlerdir. Çekme oranının kontrol edilmesiyle film kalınlığını optimize ederek gelecekte daha arzu edilen bir iletimin elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır [11]. Basit ve düşük maliyetli dönel kaplama ve sprej piroliz yöntemi kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada  $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$  bazlı çok katmanlı YÖ kaplama filmleri oluşturulmuştur. Tek katmanlı  $\text{TiO}_2$  filmi silisyum altlık üzerine kaplandığında ortalama %5.30 (300 nm ile 1100 nm aralığında),  $\text{TiO}_2$  üzerine dönel kaplama ile  $\text{ZrO}_2$  kaplandığında ise %3.30 yansımaya gözlemlemişlerdir. Ayrıca çok katmanlı YÖ

kaplama sayesinde hücrelerin dönüşüm verimliliğinin %15.19'dan %15.88'e arttığı kaydedilmiştir. Son olarak  $ZrO_2/TiO_2$  çok katmanlı YÖ kaplamalı güneş hücresinin akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) tek katmanlı kompakt  $TiO_2$  YÖ kaplamalı güneş hücresinin akım yoğunluğuna kıyasla  $2 \text{ mA/cm}^2$  den daha fazla ( $35.30 \text{ mA/cm}^2$ 'den  $37.20 \text{ mA/cm}^2$ 'ye) arttığı gözlemlenmiştir [12]. Bu örnek çalışmalarda görüldüğü üzere, güneş hücrelerinin verimliliğini arttıracak, düşük yansıtma ve yüksek geçirgenlik elde edebilen iyi optik özelliklere sahip malzemeler için alternatif dielektrik malzemeler kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Yeni nesil malzemelerden, Hafniyum oksit ( $HfO_x$ ), görünür bölgede geniş bant aralığı, yüksek indüklenen lazer hasar eşiği, yüksek termal kararlılık, düşük yansıtma ve yüksek geçirgenlik gibi mükemmel optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı YÖ kaplama için önemli potansiyele sahip malzemelerden biri olabileceği değerlendirilmektedir [13, 14].

$HfO_x$ , ultraviyole'den orta kızılötesi dalga boylarına kadar şeffaf olmasından dolayı optik endüstrisinde yaygın bir şekilde tanınmaktadır. Buna ek olarak,  $HfO_x$ , numune üzerine biriktirme işlemi sırasında iyi dayanıklılık, yüksek aşınma direnci, çizilmeye karşı direnç, iyi yüzey pürüzlülüğü ve değiştirilebilen yapılar gibi mükemmel fiziksel özelliklere sahiptir [14, 15]. Literatürde gerçekleştirilen  $HfO_x$  nanoparçacıkları çökeltme yöntemiyle yapılan bir çalışmada,  $HfO_x$  malzemesinin insan vücuduna düşük dozlarda herhangi bir zararının olmadığı ispatlanmıştır [16]. Yine yapılan başka bir çalışmada  $SiO_2$ ,  $CeO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $HfO_x$  nanoparçacıklarının hücreler üzerindeki toksikliği araştırılmış ve  $SiO_2$ , ve  $Al_2O_3$ 'nin hücrelere zarar verdiği ancak  $CeO_2$  ve  $HfO_x$ 'nin hücreye hiçbir zarar vermediği görülmüştür [17].

$HfO_x$  ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen spin kaplama yöntemiyle gerçekleştirilmiş YÖ kaplama çalışmaları ise kısıtlıdır. M.F. Al-Kuhaili ve ark. elektron demeti buharlaştırma yöntemini kullanarak oluşturdukları  $HfO_2$  filmlerini hidrojen ortamında tavladılar. Tavlamanın etkisinin, filmlerin yapısal, kimyasal, optik ve elektriksel özelliklerinin ölçümleri sonucunda kristalleşmesine ve stokiyometrinin azalmasına neden olduğunu gösterdiler. Ayrıca fotoluminesans ölçümleri sonucunda filmlerin hidrojen tavlamasından etkilenmediğini, oluşturulan filmlerin YÖ kaplama için uygun olduğunu gösterdiler [18]. Yapılan bir diğer çalışmada ise Qianqian Du ve ark. elektron demeti buharlaştırma yöntemi kullanılarak hazırladıkları  $HfO_2$  filmlerinin yapısal, optik ve dirençli anahtarlama davranışı üzerinde altlık sıcaklığının etkisini araştırdılar. Artan altlık sıcaklığı ile  $HfO_2$  filmlerinin kristalleştiğini ve küresel tane boyutunun da arttığını gösterdiler. Ayrıca,

HfO<sub>2</sub> filmlerinin ultraviyole ve görünür ışık bölgelerine yakın yerlerde yüksek geçirgenlik gösterdiklerini ve artan altlık sıcaklığı ile soğurma kenarlarında bariz bir mavi kayma olduğunu gösterdiler. Ayrıca, Ti/HfO<sub>2</sub>/ITO/cam yapısının 10<sup>4</sup> direnç oranı ile mükemmel bipolar dirençli anahtarlama davranışı sergilediğini gösterdiler [19]. HfO<sub>2</sub> filmleri, Si altlığı üzerine Yongjin Wang ve ark. tarafından elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile farklı büyüme hızlarında kaplanmıştır. HfO<sub>2</sub> filminin SEM görüntülerinin oldukça yoğun ve pürüzsüz bir yüzey olduğunu ve ayrıca büyüme oranını değiştirerek iyi bir kırılma indisi ayarlanabilirliği ve tekrarlanabilirliği elde edildiğini bildirmişlerdir. Ek olarak, HfO<sub>2</sub> filminin SOI (Silisyum üzerine kaplanmış yalıtkan) tabanlı optik dalga kılavuzu cihazları için çok çekici bir tek katmanlı YÖ kaplama olduğunu bildirdiler. HfO<sub>2</sub> filmler YÖ kaplama olarak kullanıldığında 0.05 dB/çip altındaki Fresnel kayıpları da bildirilmiştir [20]. Ayrıca Sadaf Bashir Khan ve ark. tavlamanın, HfO<sub>2</sub> yansıma önleyici ince filminin optik performansı üzerindeki etkisini araştırmak için 5°C'lik sıcaklık çıkış hızı ile 100°C ile 900°C aralığında tavlama yapmışlardır. Tavlamanın ince filmlerin optik özelliklerini etkilediği deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çünkü, sıcaklık arttıkça amorf yapıdan kristal yapıya faz geçişi olduğu ve yansıma önleyici (YÖ) verimi daha düşük bir dalga boyuna kaydığını gözlemlenmiştir [21].

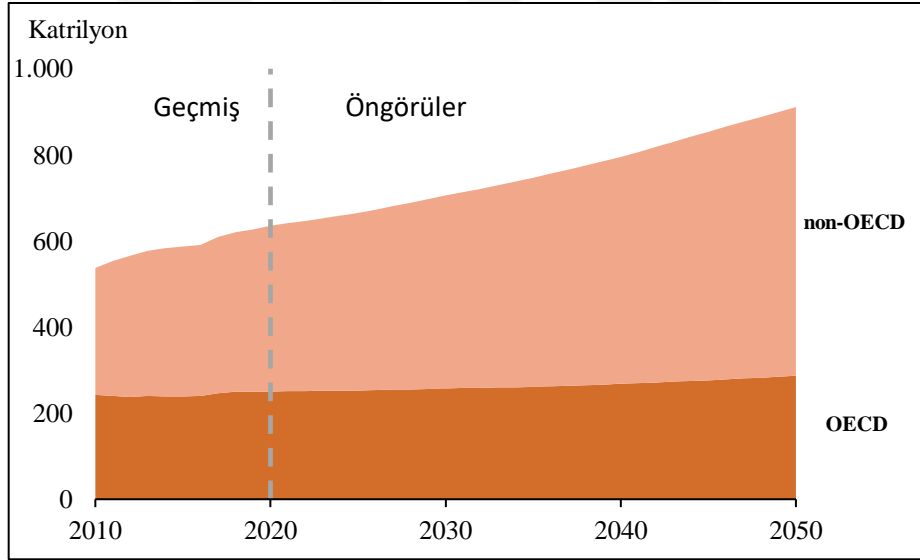
Bu tezin amacı, kristal silisyum güneş hücrelerine yönelik YÖ kaplama olarak düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir HfO<sub>x</sub> tabanlı malzemeler geliştirilerek, pasivasyon etkili katmanlar oluşturulması, güneş hücrelerindeki geçirgenliğin artırılması, yansımaların minimuma indirilmesi ve buna bağlı olarak kristal silisyum güneş hücrelerindeki verimin artırılmasıdır.

Bu çalışmada kristal silisyum güneş hücreleri için YÖ kaplama temel malzemesi olarak HfO<sub>x</sub> ince filmini seçmemizin nedeni bu malzemenin sağlığa zararlı olmaması, vakumsuz işlem ile üretilebilmesi, üstün elektriksel ve optik özelliklere sahip olmasıdır. Ayrıca HfO<sub>x</sub>'in görünür bölgede geniş bant aralığı, yüksek termal kararlılık, düşük yansıtma ve yüksek geçirgenlik gibi mükemmel optik ve elektriksel özelliklere sahip olması YÖ kaplama için uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir. HfO<sub>x</sub>'in ultraviyolede orta kızılötesi dalga boylarına kadar şeffaf olması nedeniyle optik endüstrisinde tanınıyor olsa da güneş hücreleri uygulamalarında kullanımı kısıtlıdır. Buna ek olarak, HfO<sub>x</sub>'in numune üzerine kaplama işlemi sırasında iyi dayanıklılık, yüksek aşınma direnci, çizilmeye karşı direnç, iyi yüzey pürüzlülüğü ve değiştirilebilen yapılar gibi mükemmel fiziksel özelliklere sahip olması, bizi YÖ kaplama malzemesi olarak HfO<sub>x</sub> içerikli araştırmaya yöneltmiştir.

Bunun yanında kristal silisyum güneş hücreleri uygulamaları için silisyum altlıklar üzerinde pasivasyon etkisi de araştırılmıştır.

## 1.2. Dünyadaki Enerji İhtiyacı ve Sürdürülebilirliği

Dünya üzerinde doğalgaz, petrol ve kömür mevcut olarak en çok kullanılan enerji kaynaklarıdır. Ancak bu kaynakların sürdürülebilir olmaması ekonomik, çevresel ve politik olmak üzere birçok problemi beraberinde getirmektedir. Sanayinin artması ile artan enerji ihtiyacından dolayı gelecek birkaç yüz yıl içerisinde mevcut kaynakların tükeneceği tahmin edilmektedir. Şekil 2 günümüz ve geleceğe dair enerji tüketim tahminlerini göstermektedir. Enerji tüketiminin artmasının temel nedeni güçlü ekonomik büyüme, nüfus artışı, vb. durumların olduğu OECD (Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü) ülkelerinde gerçekleşmektedir.



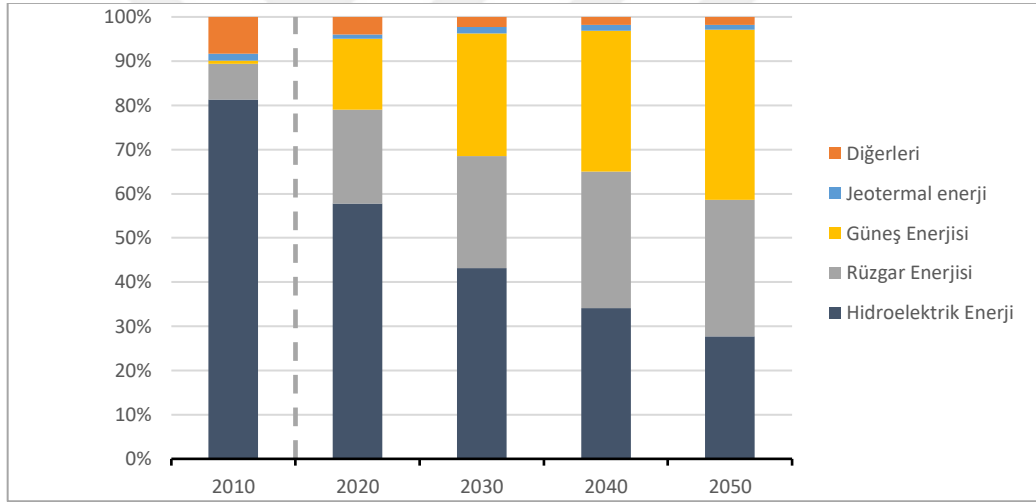
Şekil 2. Dünya enerji tüketim grafiği [22].

Nüfus artışının daha yavaş olduğu ve ekonomik büyümenin daha az olduğu ülkelerde enerji tüketimi nispeten daha düşüktür. OECD üyesi olmayan ülkelerde enerji tüketimi, OECD ülkelerinde %15'lik bir artışın aksine, 2018-2050 arasında yaklaşık %70 artmaktadır [22]. Enerji tüketiminin artması birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Enerjiye olan talebin artması sonucu elektrik enerjisinin birim fiyatları da günden güne yükselmektedir. Ayrıca buna bağlı olarak doğaya salınan karbondioksit miktarı da artmaktadır. Bu da

yeryüzünde bir takım iklimsel soruna sebep olmaktadır. Bu nedenle insanlar yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır.

### 1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları kömür, petrol, doğalgaz vb. tükenen enerji kaynaklarına çok iyi alternatif enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar arasında rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerjisi, biokütle enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve güneş enerjisi örnek olarak gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları diğer enerji kaynaklarına göre (yenilenemez enerji kaynakları) çevre dostu, yenilenebilir, ekonomik ve kolay üretim gibi birçok avantaja sahiptir. Şekil 3 dünya 2010-2050 yılları arasındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının net elektrik üretiminin yüzdelik payını göstermektedir.



Şekil 3. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen net elektrik üretiminin payı [22].

Şekil 3'e göre 2018 yılında %62 olan hidroelektrik gücü 2050 yılında %28'e düşmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları arasından rüzgâr ve güneş enerjisinde üretilen elektrik üretimi 2018-2050 yılları arasında en büyük artışı göstererek sırasıyla 6.7 ve 8.3 trilyon kilovatsaat (kWh)'e ulaşmaktadır. Bunun asıl nedeni ise bu teknolojilerin daha rekabetçi hale gelmesi ve bir çok ülkedeki hükümet politikaları tarafından desteklenmesi olarak gösterilmektedir [22].

#### 1.4. Fotovoltaik Güneş Hücreleri ve Tarihçesi

Fotovoltaik güneş hücreleri (PV), güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken aygıtlar olarak isimlendirilir. Güneşten gelen fotonların silisyum gibi yarı iletkenlerde elektron hareketine neden olarak bir elektrik akımının oluşmasını sağlar. Fotovoltaik güneş hücresi klasik olarak p-n eklem diyotunda olduğu gibi elektronların, p ve n tipi iki yarı iletken arasındaki hareketi sonucu oluşur. İlk yarı iletken p-n bağlantı güneş hücreleri 1941'de Bell Laboratuvarları Russel Ohl tarafından tanımlanmıştır [23].

Edmund Becquerel elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaik olayını 1839 yılında keşfetmiştir [24]. Katı cisimlerde ise fotovoltaik olay 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde gösterilmiştir [25]. 1954 yılında ham madde olarak silisyumun güneş hücrelerinde kullanılmasıyla birlikte %6'lık bir dönüşüm verimliliği sağlayan ilk hücre yapısı Bell Laboratuvarlarında üretilmiştir [26].

Günümüzde kullanılan güneş hücrelerinin %90'ı kristal silisyum güneş hücrelerinden oluşmaktadır [27] ve bu güneş hücrelerinde %25-30 arasında verim elde edilmektedir. Ancak hem yüksek verim hem de düşük maliyetli pillerin üretilmesi oldukça önemlidir. Bu nedenle güneş hücreleri üzerinde verim iyileştirmeleri yanında düşük maliyetli güneş hücrelerinin üretilmesi üzerine de birçok araştırma yapılmaktadır. Şimdiye kadar silisyum tabanlı güneş hücrelerinin yanında farklı türde birçok güneş hücresi geliştirilmiştir ve bu güneş hücrelerine ait verim değerleri ve elektriksel verileri Tablo 1'de gösterilmektedir.

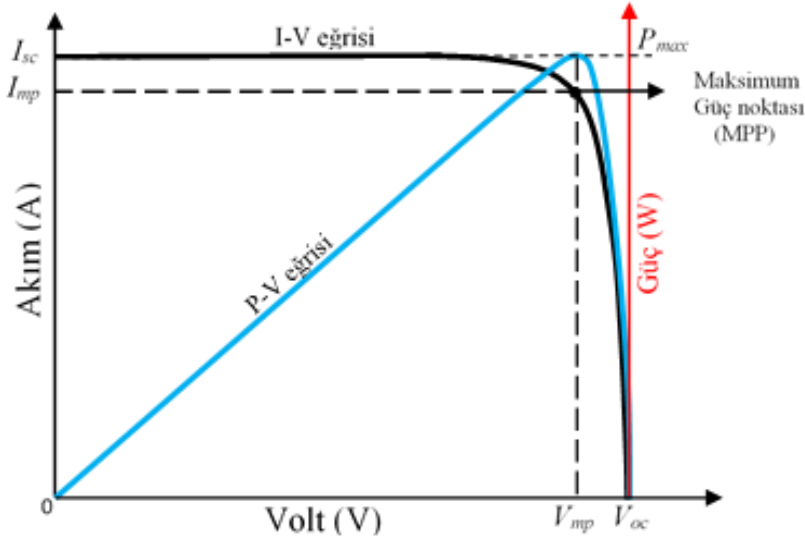
Tablo 1. Türlerine göre güneş hücrelerinin maksimum elektriksel değerleri [5].

Güneş hücresi	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	Doldurma Faktörü (%)	Verim (%)	Alan (cm <sup>2</sup> )
Si (kristal hücre)	42.65	0.73	84.90	26.7 ± 0.5	79.00
GaAs (ince film)	29.78	1.12	86.70	29.1 ± 0.6	0.99
GaAs (multikristal)	23.20	0.99	79.70	18.4 ± 0.5	4.01
InP (kristal hücre)	31.15	0.93	82.60	24.2 ± 0.5	1.00
CIGS (hücre)	39.58	0.73	80.40	23.35 ± 0.5	1.04
CdTe (hücre)	30.25	0.87	79.40	21.0 ± 0.4	1.06
CZTSSe (hücre)	33.57	0.53	63.00	11.3 ± 0.3	1.17
CZTS (hücre)	21.77	0.70	65.10	10.0 ± 0.2	1.11
Perovskite (hücre)	21.64	1.19	83.60	21.6 ± 0.6	1.02
Dye (hücre)	22.47	0.74	71.20	11.9 ± 0.4	1.00
Organic (hücre)	23.28	0.84	68.60	13.45 ± 0.2	1.02

Tablo 1’de görüldüğü gibi en yüksek verim değeri GaAs tabanlı güneş hücrelerine aittir. Ancak günlük kullanım için, oldukça maliyetli olması ve arsenik maddesinin toksik potansiyelinden dolayı çok tercih edilmemektedir [28]. Diğer yandan silisyum tabanlı güneş hücreleri hem yüksek verim hem uygun maliyetli hem de uzun ömürlü [29] olmasından dolayı günümüzde ticari anlamda en çok tercih edilen güneş hücreleridir.

### 1.5. Fotovoltaik Güneş Hücresi Parametreleri

Güneş hücrelerinin karakteristik özelliklerini belirlemek için I-V eğrisi kullanılır. I-V eğrisi, güneş hücresinin hem karanlık hem de aydınlık koşullarda elektriksel davranışlarına bağlıdır. Şekil 4, geleneksel bir güneş hücresinin herhangi bir sıcaklık ve ışınımdaki karakteristik I-V eğrisini temsil etmektedir. I-V eğrisinden güneş hücrelerinin performansını gösteren önemli parametreler olan açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), doldurma faktörü ( $FF$ ) ve güç dönüşüm verimliliği ( $\eta$ ) elde edilebilir. Güneş hücresinin çalışması boyunca elde edilebilecek maksimum akım  $I_{sc}$  ve maksimum voltaj değeri  $V_{oc}$  ile gösterilir. Ayrıca I-V eğrisinin altında kalan en büyük dikdörtgensel alan ise güneş hücresinin o anda üretmiş olduğu maksimum gücü ( $P_{max}$ ) verir ve bu güçteki akım  $I_{mp}$ , gerilim ise  $V_{mp}$  ile gösterilmektedir.



Şekil 4. Güneş hücresi I-V ve P-V eğrisi

### 1.5.1. Kısa Devre Akımı

PV hücrenin kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), sıfır gerilim ve aydınlatma altında hücreden geçen akımdır. Paralel direncin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit ve ışınım şiddetine bağlıdır [30]. Bir PV hücresi aydınlatma olmadığı zaman bir diyot gibi davranır. Ancak aydınlatma altında akım kaynağı görevi görür. Karanlık ortamdaki güneş hücresi diyot denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$I_{karanlık} = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Aydınlatma olması durumunda ise, güneş hücresi diyot denklemi

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

şeklinde gösterilir. Kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) güneş hücrelerinin performansını karakterize etmek için daha yaygın kullanılır ve kısa devre akımının hücre alanına bölünmesi sonucu elde edilir ve

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir.

Kısa devre akımı, genel olarak güneş ışınımına, hücre alanına, optik özelliklerine vb. bağlıdır. 1.5 hava kütlesi (AM 1.5) spektrumunun altında, bir silisyum güneş hücresi için teorik akım yoğunluğu  $46 \text{ mA/cm}^2$ 'dir. Laboratuvarında üretilen güneş hücrelerinde kısa devre akımı  $42 \text{ mA/cm}^2$  ölçülürken, ticari silisyum güneş hücrelerinde  $28 \text{ mA/cm}^2$  ile  $35 \text{ mA/cm}^2$  aralığında değişmektedir [31].

### 1.5.2. Açık Devre Voltajı

Fotovoltaik bir güneş hücresinin açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda hücre uçlarından ölçülen gerilimdir. Denklem (1.4) açık devre voltajını ifade etmektedir.



$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (1.4)$$

Buradan idealite faktörü,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı,  $q$  temel yükü,  $I_{ph}$  aydınlanma altında üretilen akımı  $n$  idealite faktörü ve  $I_0$  karanlıktaki sızıntı akımını temsil etmektedir. Ayrıca p-tipi güneş hücresi için açık devre gerilimi, taşıyıcı konsantrasyonu ile

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{(N_A + \Delta p)\Delta n}{n_i^2} + 1\right] \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\frac{kT}{q}$  termal voltaj,  $N_A$  katkı konsantrasyonu,  $\Delta n$  ve  $\Delta p$  aşırı taşıyıcı konsantrasyonu,  $n_i$  ise asal taşıyıcı konsantrasyonudur [32].

### 1.5.3. Doldurma Faktörü (Doluluk Oranı)

Doluluk oranı, güneş hücresinden üretilen maksimum güç miktarının kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına olan oranıdır.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (1.6)$$

denklemleri ile ifade edilir.

### 1.5.4. Verim

Bir güneş hücresinin verimliliği, maksimum güç noktasına karşılık gelen güç çıkışının güç girişine oranı olarak tanımlanır ve

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} = \frac{P_{max}}{P_{in} \times A_{Alan}} = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}} \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $P_0$  güneş hücresinin üzerine düşen optik güçtür.  $P_{max}$  ise güneş hücresinin AM1.5 aydınlatması altında ürettiği en büyük güçtür.

### 1.5.5. Seri Direnç

Güneş hücrelerinde serbest taşıyıcılar emitter ve taban arasında, Si ve metal yüzey arasındaki temas noktalarında, üst ve arka metal kontaklarında vb. her bir bölgede dirençle karşı karşıya gelecek şekilde geçer. Bu yolda karşılaşılan toplam dirence seri direnç denir. Güneş hücrelerinde  $R_e$  emiter direnci,  $R_{c,e}$  emiter kontağının direnci,  $R_{c,rear}$  arka kontak direnci,  $R_{bus}$  ( $R_{busbar}$ ) bara direnci,  $R_{fi}$  ön parmak direnci ve  $R_{edge}$  altlığın kenarlarındaki direnç olmak üzere bu dirençlerin toplamı seri direnci ( $R_s$ ) ifade eder ve

$$R_s = R_e + R_b + R_{c,e} + R_{c,rear} + R_{bus} + R_{fi} + R_{edge} \quad (1.8)$$

şeklinde gösterilir [33].

Güneş hücreleri için seri direnç çok önemli bir faktördür. Bir güneş hücresinin seri direnci, dönüşüm verimliliği ve doldurma faktörü üzerinde önemli bir etkisi vardır. Seri direncin mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Çünkü seri dirençteki her 0.1  $\Omega$ 'luk artış için verim ( $\eta$ ) yaklaşık olarak %2.50 azalır [34].

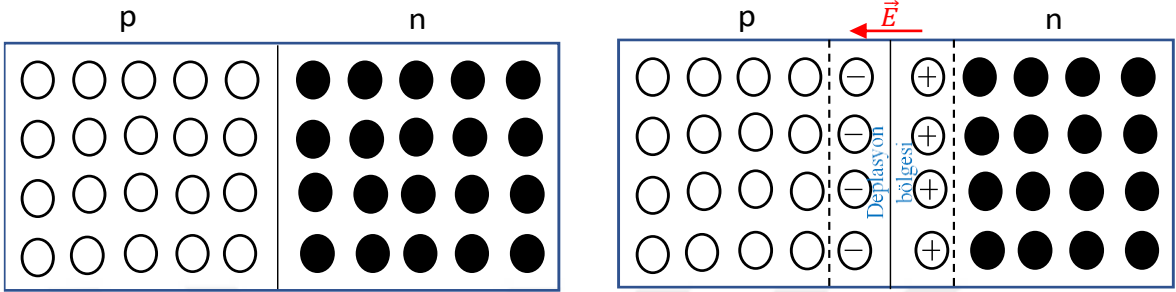
### 1.5.6. Paralel Direnç

Paralel direnç, güneş hücresindeki üretim hatalarından ziyade genel olarak güneş hücrelerinin yapımında kullanılan yarı iletkendeki kusurlardan meydana gelmektedir. Düşük paralel direnci, ışık tarafından üretilen akım için alternatif bir akım yolu sağlayarak güneş hücrelerinde güç kayıplarına neden olmaktadır. Genel olarak laboratuvar hücreleri için Paralel direnç değeri  $M\Omega\text{cm}^2$  büyüklüğündeyken ticari hücreler için bu değer  $1000 \Omega\text{cm}^2$  civarındadır [31].

## 1.6. P-N Eklemi

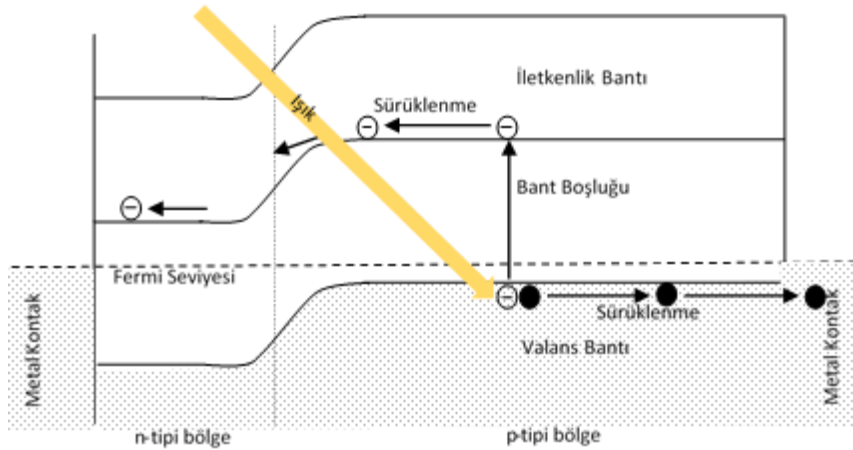
P-n eklemi p ve n tipi iki yarı iletkenin fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucu meydana gelmektedir. P ve n tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki bölge de elektriksel olarak nötrdür. Kısacası her bir bölgedeki elektron ve boşluk sayıları birbirine eşittir. p ve n tipi yarı iletkenler bir araya getirildiğinde n tipi yarı iletken p-tipi yarı iletkene doğru elektron geçişi olur ve her bir elektron yerini bir boşluğa bırakır böylece p tipi bölgeye geçen elektron sayısı kadar n-tipi yarı iletken bölgesinde boşluk oluşur. Sonuç

olarak her iki yarı iletkenin fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar elektron ve boşluk geçişi devam eder ve iki yarı iletkenin eklem yerinde yüklerden arındırılmış bir bölge oluşur, buna deplasyon bölgesi adı verilir. Deplasyon bölgesinde kutuplanmış yükler nedeniyle bir elektrik alan meydana gelir. Oluşan elektrik alan hem p hem de n bölgesinde azınlık taşıyıcıların hareketine sebep olur.



Şekil 5. P-n eklem diyotunun şematik gösterimi (○-boşluk,● - elektron, ⊖-negatif iyon,⊕-pozitif iyon)

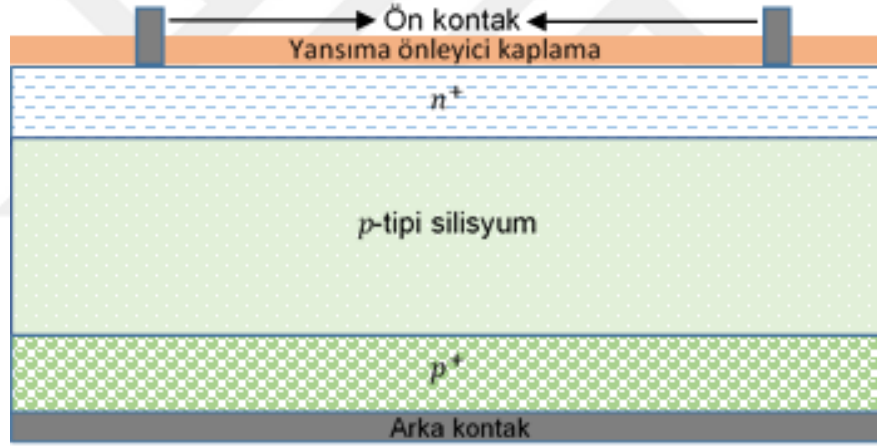
Şekil 5 klasik bir p-n eklemiyonunu göstermektedir. Güneş hücreleri genel olarak aydınlatma olmadığı zaman p-n eklem diyotu gibi davranırlar. Ancak diyot aydınlatıldığı zaman p ve n bölgesine gelen fotonlar soğurulduğunda enerjisi, yasak bant aralığından daha yüksek olan fotonlar, değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkararak elektron-boşluk çiftleri oluştururlar. Sonrasında elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılarak, harici yük üzerinden bir foto akım akar ve böylelikle yüksek enerjili elektronlar enerjisini harici yüke aktararak tekrar güneş hücresine dönerler [35]. Güneş hücresinin aydınlanma altındaki enerji bant diyagramı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Güneş hücresinin aydınlanma altındaki enerji bant diyagramı [36].

## 1.7. Kristal Silisyum Tabanlı Güneş Hücreleri

Günümüzde kullanılan güneş hücrelerinin yaklaşık %90'ı kristal silisyumdan oluşmaktadır ve bugüne kadar fotovoltaik endüstrisinde kullanılan en önemli malzemedir [27, 37, 38]. Günümüzde piyasada bulunan monokristal ve polikristal olmak üzere iki tür kristal silisyum güneş hücresi bulunmaktadır. Monokristal silisyum, sınırlara kadar bütün ve sürekli olan kristal örgüde katı bir malzemedir. Polikristal silisyum, rastgele yönlerde karıştırılan birçok küçük monokristalden oluşan bir malzemedir. Monokristal silisyum güneş hücreleri, polikristal silisyum güneş hücrelerine göre daha az kusur içerdiğinden daha yüksek verimliliğe sahiptir ve bu yüzden taşıyıcı yükler daha uzun rekombinasyon süresine sahiptir. Geleneksel bir p-tipi kristal silisyum tabanlı güneş hücresinin yapısı Şekil 7'de gösterildiği gibidir.

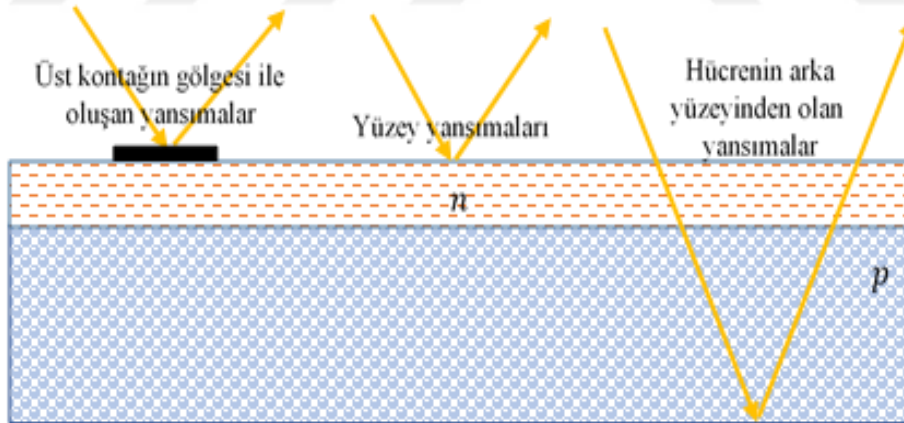


Şekil 7. Geleneksel p-tipi kristal silisyum güneş hücresinin yapısı

Geleneksel bir silisyum güneş hücresinin yapısı p-tipi gövde, n-tipi emitör, p+ arka yüzey katmanlarından (BSF) oluşur. Bu katmanlar arasında p-n eklemi boyunca yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye yayılan elektron ve boşluklar arasında fiziksel bir bariyer oluşturulur. Deplasyon bölgesi olarak adlandırılacak bu bölge sayesinde, güneş ışınımı ile gelen fotonların oluşturacağı elektron-boşluk çiftleri ayrılıp ilgili kontaklara sürüklenebilecektir. Sürüklenen elektron ve boşlukları kanalize edebilmek ve elektrik üretebilmek için ön ve arka tarafa metal kontakların yapılması gerekir ki bu kontaklar geleneksel hücreler için Ag (ön kontak) ve Al (arka kontak) olmaktadır.

## 1.8. Güneş Hücrelerindeki Optik Kayıplar

Fotonların soğurulması yoluyla taşıyıcılarının üretilmesi, güneş hücrelerinin elektrik akımını üretim mekanizmasıdır. Etkin bir güneş hücresinin tasarımı için ışığın güneş hücresinde verimli bir şekilde soğurulması son derece önemlidir. Güneş hücreleri üretimde kullanılan malzemelerin ışığı yansıtma doğasından dolayı gelen ışığın bir kısmını yansıtır. Bu yansımalar, yük taşıyıcılarının üretimini önemli ölçüde azaltarak düşük verimliliğe neden olabilir. Şekil 8 güneş hücresinin farklı bölümlerinde yansımaları göstermektedir. Güneş ışığı güneş hücresinin ön yüzeyini aydınlattığında, ışık enerjisinin bir kısmı hücreye iletilir ve elektrik enerjisine dönüştürülürken, bir kısmı ön yüzeyden yansır [39]. Işığın soğurulmadan geri yansınması optik kayıplar olarak değerlendirilir. Yansıma nedeniyle oluşan optik kayıplar, genel olarak, güneş hücresinin üst kontağının gölgesinden dolayı oluşan yansımalar, yüzey yansımaları ve hücrenin arka yüzeyinden oluşan yansımalarıdır. Güneş hücrelerindeki yansımaları azaltmak için; YÖ kaplama, ışığın tuzaklanması, yüzeyin dalgalandırılması ve siyah yüzeyli silisyum kullanılması gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [39, 40].



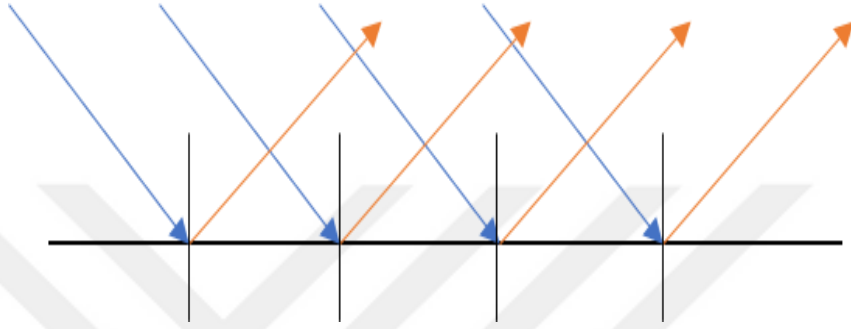
Şekil 8. Yansımalarından dolayı optik kayıplar

## 1.9. Yansıma (R)

Bir yüzeye ışık huzmesi düştüğünde, ortamların kırılma indisine bağlı olarak bir kısmının yansıtıldığı, bir kısmının emildiği ve bir kısmının kırıldığı veya saçıldığı nesneye girer. Her yüzey, geliş açısına eşit bir açıda (speküler olarak yansıyan) ve diğer tüm yönlerde

(Difüz olarak yansıyan) bir miktar ışığı yansıtır [41]. Birinci ortamdan ikinci ortama geçen ışınlar yayılma açısını değiştirerek ilerleyeceklerdir. Kırılma indisi ve yayılma açısı Snell yasası [42] ve nicel olarak eşitlik (1.51) ile hesaplanabilmektedir.

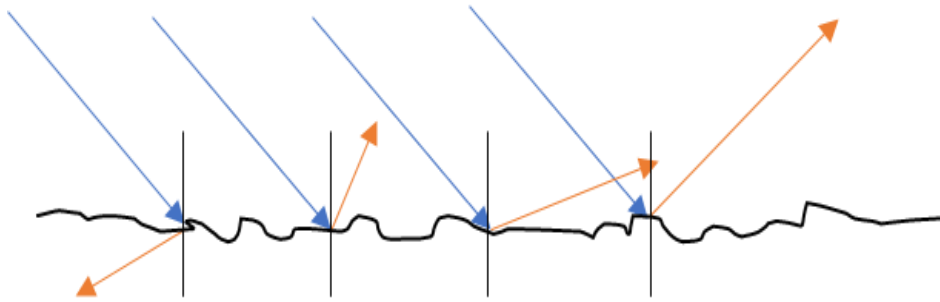
### 1.9.1. Speküler Yansımaya



Şekil 9. Pürüzsüz yüzeyden ışınların yansıması

Speküler yansımaya Şekil 9'da görüldüğü gibi pürüzsüz bir yüzeye gelen ışınların gelme açısına eşit bir açıyla geri yansıması olarak bilinir. Speküler yansımaya, yüzeyin kırılma indisinin ( $n$ ), soğurma katsayısının ( $k$ ), ışık demetinin geliş açısının ( $\theta$ ) ve yansıyan ışığın doğasının bir fonksiyonudur.  $N$  ve  $k$  değerleri, malzemenin optik sabitleri olarak adlandırılırlar [41].

### 1.9.2. Difüz Yansımaya

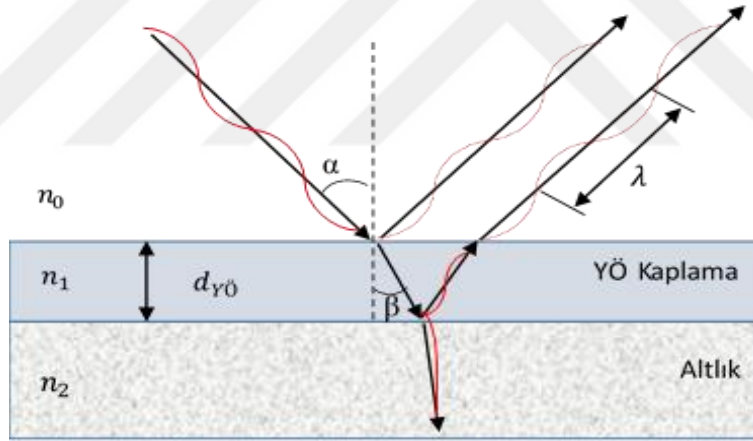


Şekil 10. Pürüzlü yüzeyden ışınların yansıması

Pürüzlü yüzeylerin yansımaları, difüz (dağınık) yansıma olarak bilinen bir yansıma türüne yol açar. Difüz yansıma, pürüzlü yüzeylerden ışığın gelme açısından farklı bir açıyla yansımaları olayıdır, bir başka deyişle pürüzlü yüzeye herhangi bir açıyla gelen bir ışın, speküler yansıma durumunda olduğu gibi tek bir açıda değil, birçok açıda yansır ya da dağılır [43]. Difüz yansıma şematik olarak Şekil 10'da gösterilmiştir.

### 1.10. Yansıma Önleyici Kaplamalar

Günümüz modern güneş hücrelerinin ayrılmaz bir parçası olan ve maksimum verim elde etmede kullanılan en önemli tekniklerden biri de yansıma önleyici kaplamalardır. YÖ kaplama, ışığın geçirgenliğini arttırmak ve yansımalarından dolayı optik kayıpları azaltmak için numunenin üst yüzeyine yerleştirilen ince bir dielektrik malzeme tabakasıdır, böylece güneş hücresinin genel verimliliği artar. Tek katmanlı YÖ kaplama Şekil 11'de şematik olarak gösterilmiştir.

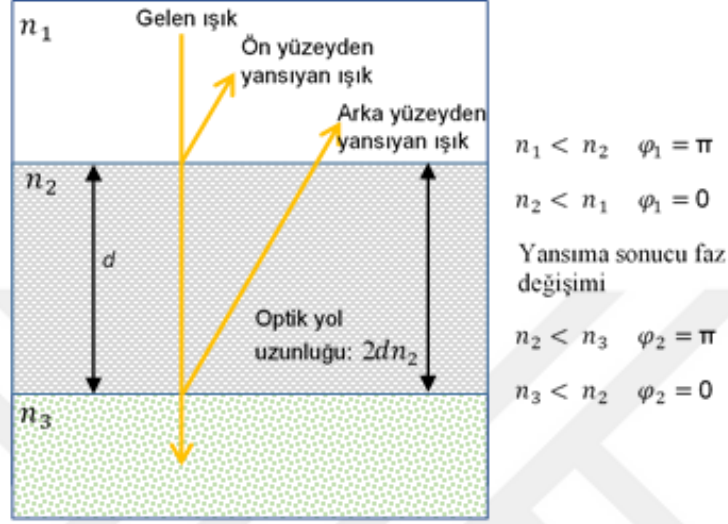


Şekil 11. Tek katmanlı yansıma önleyici kaplama

Optik kayıplardan dolayı düşük verimli silisyum güneş hücrelerinin yüzeyinde yüksek bir yansıma vardır; yüzeye gelen ışığın %30'undan fazlası geri yansıtılır ve sonuçta toplam verimlilik büyük bir kayıpla sonuçlanır. YÖ kaplama, yansıyan dalgaların birbiriyle faz dışına çıkması için özel olarak hesaplanmış bir kalınlığa sahiptir ve yıkıcı girişim olarak adlandırılan bir olaya neden olur [44, 45].

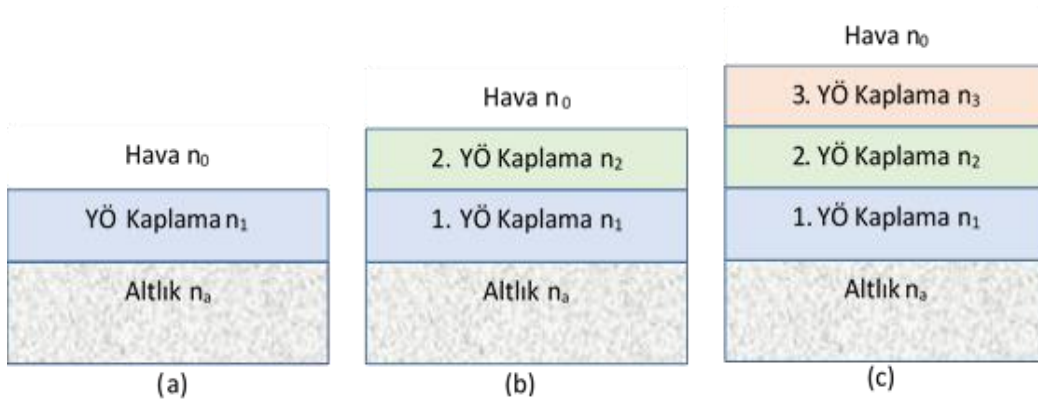
Yıkıcı girişim, aynı frekansta zıt iki ışık dalgasının birbiriyle karşılaşması sonucu gerçekleşir ve bu da her iki dalganın da yok olmasına neden olur. YÖ kaplama, yansıyan her bir dalganın birbirini yok etmesi için özel olarak tasarlanmış bir kalınlığa sahiptir. Sonuç

olarak, yansıma nedeniyle ortaya çıkan net kayıp minimize edilmiştir. Şekil 12, YÖ kaplamanın çalışma prensibini göstermektedir. İyi bir YÖ kaplamaya sahip güneş hücreleri, kaplama yapılmamış güneş hücreleriyle kıyaslandığında daha yüksek verimliliğe sahip oldukları görülür [46].



Şekil 12. Yansıma önleyici kaplamanın çalışma prensibi

YÖ kaplama arka arkaya istiflenmiş farklı kırılma indislerine sahip tek, çift veya çok tabakalı dielektrik malzemelerden oluşabilir. YÖ kaplamanın amacı, bazı dalga boylarındaki ışık yansımalarını engelleyerek mümkün olan en düşük kayıplı hale getirmek ve en uygun ışık geçirgenliğini sağlamaktır. Farklı dalga boylarındaki ışığın daha iyi soğurulabilmesi için Şekil 13'te gösterildiği gibi uygun kırılma indislerine sahip iki veya daha fazla dielektrik malzeme birleştirilerek yansıma daha da azaltılabilir.



Şekil 13. (a) Tek katmanlı, (b) iki katmanlı, (c) üç katmanlı YÖ tabakaların şematik gösterimi



YÖ kaplama, birçok uygulamada, optik ve optoelektronik gibi çeşitli araştırma alanlarında büyük ilgi görmektedir. Bir güneş hücresinin verimliliği, iyi bir YÖ kaplama kullanılarak hücrenin yüzeyinden minimum yansımaya olmasını sağlayarak artırılabilir. Yansıtmayı azaltmak için kullanılan en bilinen yöntem, yüzeyin uygun kırılma indisine ve optimize edilmiş bir kalınlığa sahip ince bir film ile kaplanmasıdır [47]. Yansımının minimum olabilmesi için kaplama malzemesinin son derece şeffaf olması,  $n_1 = \sqrt{n_0 n_a}$  (burada sırasıyla  $n_1$ ,  $n_0$  ve  $n_a$  YÖ kaplamanın, ışığın geldiği ortamın ve altlığın kırılma indisidir) ve kaplama kalınlığı gelen ışığın dalga boyunun dörtte biri olmalıdır. Ancak son derece şeffaf malzemeler sınırlı olduğu için YÖ kaplama malzemelerin performansını iyileştirmek için kırılma indisini ayarlama yollarına başvurulmuştur [48]. YÖ kaplama için kullanılan bazı malzemeler ve kırılma indisleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

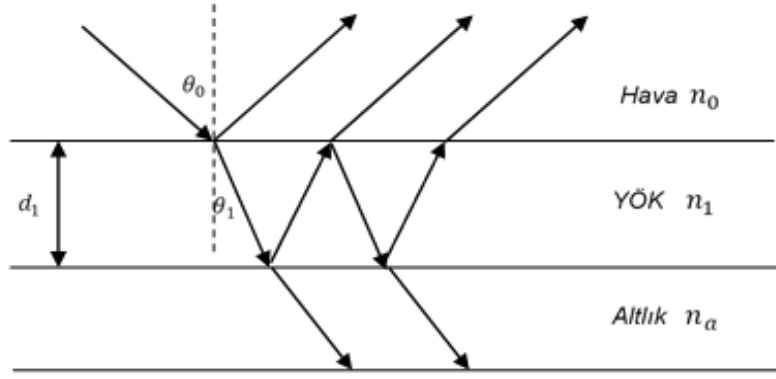
Tablo 2. Güneş hücresi için kullanılan yansımaya önleyici kaplamaların kırılma indisleri [39].

Malzeme	Kırılma indisi (n)
MgF <sub>2</sub>	1.38
SiO <sub>2</sub>	1.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2.00
ZnS	2.36
TiO <sub>2</sub>	2.62

Tek katmanlı YÖ kaplama genellikle görünür bölgenin ortasında yansımaları engelleyebilir fakat çok katmanlı YÖ kaplama ortalama yansımaya daha geniş spektrumda azaltabilir [39]. Kristal silisyum güneş hücrelerinde kullanılan malzemelerin performansı ise hücrenin çalışma aralığı olan yaklaşık 250-1100 nm aralığında maksimum olmalı ve bu aralıktaki yansımaya değerleri düşük olmalıdır.

### 1.10.1. Tek Katmanlı Yansımaya Önleyici Kaplamalar

Tek katmanlı yansımaya önleyici kaplama, ince film tasarımı ve imalat tekniğinin en eski ve en basit uygulamasıdır [49]. Basitçe herhangi bir kaplama malzemenin altlık üzerine Fresnel ve Bragg yasaları ile belirlenen bir kalınlıkta kaplanması ile meydana gelmektedir. Kaplanan malzemenin kırılma indisinin altlığın kırılma indisinden küçük olması gerekmektedir. Şekil 14, tek katmanlı yansımaya uygulanmış bir yüzeyi temsil etmektedir.



Şekil 14. Tek katmanlı yansımaya önleyici kaplama uygulanmış yüzeyden yansımalar

Yüzeğe gelen ışık dalgalarının bir kısmı kaplama tarafından soğurularak malzeme içine hapsedilirken bir kısmı da yüzeyden tekrar geri yansımaktadır. YÖ malzemeler belirlenirken öncelikle malzemenin kırılma indisi dikkate alınır. İyi bir yansımaya önleyici tabaka için kaplama malzemesinin kalınlığı, gelen ışığın dalga boyunun dörtte biri şeklinde olmalıdır. Ayrıca kaplama malzemesinin kırılma indisi ışığın geldiği ortamın kırılma indisi ile altığın kırılma indisinin kareköküne eşit olmalıdır [50]. Yani;

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_a} \quad (1.9)$$

dir. Tek katmanlı yansımaya önleyici kaplama için yansıtıcılık ifadesi,

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta} \quad (1.10)$$

şeklindedir. Burada;

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (1.11)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_a}{n_1 + n_a} \quad (1.12)$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda_0} \quad (1.13)$$

şeklindedir ve

$$n_1 d_1 = \frac{\lambda_0}{4} \quad (1.14)$$

olduğunda yansımaya minimum olur yani,

$$R_{min} = \left[ \frac{n_1^2 - n_0 n_a}{n_1^2 + n_0 n_a} \right]^2 \quad (1.15)$$

şeklini alır.

### 1.10.2. İki Katmanlı Yansımaya Önleyici Kaplamalar

Çift katmanlı YÖ kaplama, güneş hücresinin daha yüksek dalga boylarında yüzeydeki yansımaları azaltmaktadır. Çift katmanlı YÖ kaplamanın kırılma indisleri aşağıdaki gibi teorik olarak hesaplanabilir.

$$n_1^3 = n_0^2 n_a \quad (1.16)$$

$$n_2^3 = n_0 n_a^2 \quad (1.17)$$

Çift katmanlı YÖ kaplama için yansımaya ifadesi ise;

$$R = \frac{A+B+C+D+E+F}{1+(r_1^2 r_2^2)+(r_1^2 r_3^2)+(r_2^2 r_3^2)+C+D+E+F} \quad (1.18)$$

şeklinde gösterilir. Burada;

$$A = (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2) \quad (1.19)$$

$$B = (r_1^2 r_2^2 r_3^2) \quad (1.20)$$

$$C = 2r_1 r_2 (1 + r_3^2 \cos 2\theta_1) \quad (1.21)$$

$$D = 2r_2 r_3 (1 + r_1^2 \cos 2\theta) \quad (1.22)$$

$$E = 2r_1 r_3 \cos 2(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.23)$$

$$F = 2r_1 r_2 r_3 \cos 2(\theta_1 - \theta_2) \quad (1.24)$$

ayrıca,

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (1.25)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (1.26)$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (1.27)$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda_0} \quad (1.28)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda_0} \quad (1.29)$$

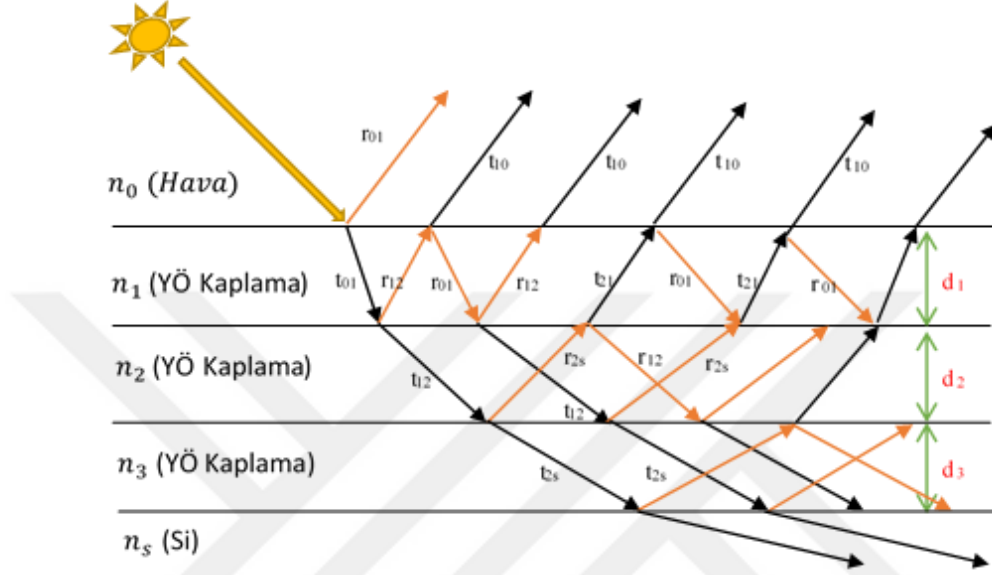
ile ifade edilir [39]. Burada  $n_0$  ışığın geldiği birinci ortamın kırılma indisi,  $n_1$  birinci filmin kırılma indisi,  $n_2$  ikinci filmin kırılma indisi ve  $n_a$  altlığın kırılma indisi.

### 1.10.3. Çok Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar

Güneş hücrelerinin yüzeyine gelen ışınların yüzeyden geri yansımalarını en aza indirecek ve daha yüksek verimlilikle spektral bir aralıkta çalışmasını sağlayacak çok katmanlı YÖ kaplamalar oluşturulabilir. Tek katmanlı bir YÖ kaplama, yalnızca bir dalga boyunda, genellikle görünür bölgenin orta bölgesinde yansımayı en aza indirebilir ancak çok katmanlı YÖ kaplamalar, tüm görünür spektrumda daha etkilidirler [9, 51].

Şekil 15'te kalınlıkları ve kırılma indisleri birbirinden farklı birden fazla ince film üst üste bindirilerek çok katmanlı bir YÖ kaplama şematik olarak gösterilmiştir. YÖ kaplamalarda farklı ince filmlerden oluşan katman sayısı arttıkça yansıma spektrumlarını

simüle etmek için kullanılan matematiksel ifadeler daha karmaşık hale gelmektedir. Sadece Fresnel eşitliklerini kullanan Rouard modeli, basitleştirilmiş matematiksel yaklaşımı sayesinde çok sayıda dielektrik ince film katmanının yansıtma spektrumlarını kolayca hesaplayabilir [36].



Şekil 15. Çok katmanlı yansıtma önleyici uygulanmış yüzeyden ışınların yansıması

Genelleştirilmiş Rouard yöntemini kullanan Fresnel denklemlerinden  $k$ , ince film katman sayısı olmak üzere;

$$\delta_k = \frac{2\pi n_k d_k \cos \theta_k}{\lambda_0} \quad (1.30)$$

Sadece  $k$ . katman için,

$$r_{k(s,p)} = \frac{(r_{k-1,k}) + (r_{k,k+1})e^{-2i\delta_k}}{1 + ((r_{k-1,k}))(r_{k,k+1})e^{-2i\delta_k}} \quad (1.31)$$

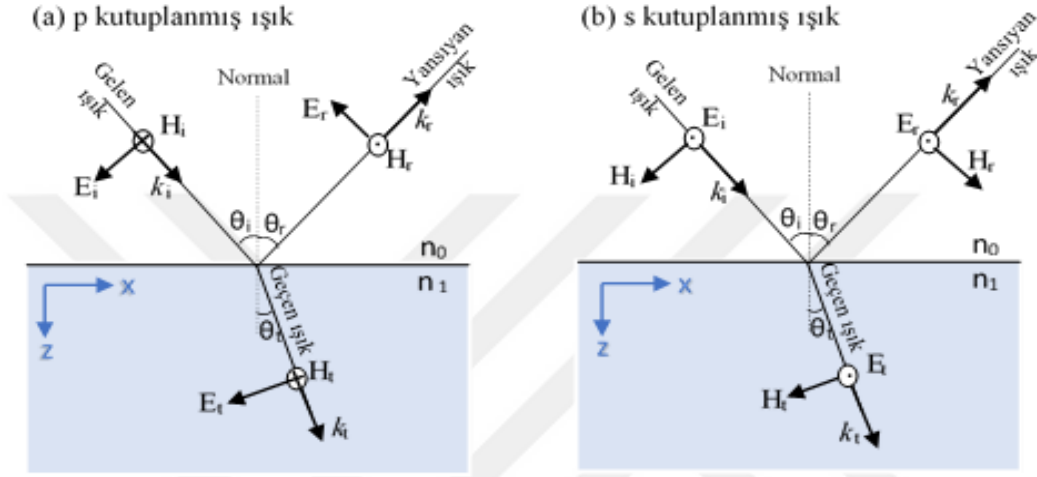
$k-1$  katmanı için  $k=2$  ye kadar,

$$r_{1(s,p)} = \frac{(r_{0,1}) + (r_{2,1})e^{-2i\delta_1}}{1 + ((r_{0,1}))(r_{2,1})e^{-2i\delta_1}} \quad (1.32)$$

$$R = \left| \frac{r_{1(s)}^2 + r_{1(p)}^2}{2} \right| \quad (1.33)$$

olarak elde edilir.

### 1.11. Fresnel Denklemleri



Şekil 16. Yüzeğe gelen ışık dalgası ve düzlemi arasındaki ilişki

Fresnel denklemleri, bir arayüzeydeki ışığın davranışını tanımlar ve arayüzeyden iletilen ışığın sadece kırılma indislerine değil aynı zamanda gelen ışığın kutuplanma durumuna da bağlı olduğunu gösterir [52]. Güneşten yayılan ışık, polarize olmamış bir ışıktır. Polarize olmamış bir ışığın toplam yansımısını hesaplamak için yansıyan ışığın s ve p kutupları için Fresnel denklemlerini çözmemiz gerekir [53].

Şekil 16 bir yüzeğe gelen ışık dalgasının s ve p kutuplarının vektörel yönelimlerini temsil etmektedir. Fresnel denklemlerini elde etmek için Şekil 16'da gösterildiği gibi bir arayüzeyle ayrılmış iki optik ortamı göz önünde bulunduralım. Yüzeğe gelen ışığın dalga vektörü  $k_i$ , dalga vektörünün yüzey normali ile yaptığı açı  $\theta_i$ , ışık dalgasının elektrik alan genliği  $E_i$  ve manyetik alan genliği ise  $H_i$  ile gösterilmiştir. Aynı şekilde bu ifadeler yansıyan ışık dalgası için sırasıyla  $k_r$ ,  $\theta_r$ ,  $E_r$  ve  $H_r$  ile ifade edilir. Benzer şekilde kırılan ışık dalgası için bu gösterimler  $k_t$ ,  $\theta_t$ ,  $E_t$  ve  $H_t$  şeklindedir. Düzleme gelen ışık dalgasının monokromatik bir ışık dalgası olduğu varsayılırsa [54];

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{i(\vec{k}_i \vec{r} - \omega t)} \quad (1.34)$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \cos(\vec{k}_i \vec{r} - w_i t) \quad (1.35)$$

denklemleri, yansıyan ve kırılan ışık dalgaları için tekrar düzenlenirse,

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{i(\vec{k}_r \vec{r} - w_r t)} \quad (1.36)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(\vec{k}_t \vec{r} - w_t t)} \quad (1.37)$$

elde edilir. Yazmış olduğumuz bu eşitlikler ışığın herhangi bir kutuplanma durumu için yazılabilir. Gelen, yansıyan ve kırılan ışık dalgasının elektrik alan bileşenleri zamandan bağımsız ve sabittir. Yüzeye teğet olan elektrik alanı  $E$  ve manyetik alan  $H$  bileşenleri sınır boyunca sürekli olmalıdır. Sınırdaki gelen ışık, yansıyan ışık ve kırılan (geçen) ışık aynı anda çıkar. Yani;

$$(\vec{k}_i \vec{r} - w_i t) = (\vec{k}_r \vec{r} - w_r t) = (\vec{k}_t \vec{r} - w_t t) \quad (1.38)$$

sınır düzleminde  $r=0$  alınır;

$$w_i t = w_r t = w_t t \quad (1.39)$$

elde edilir ve (1.39) eşitliğinin zamandan bağımsız olduğu görülür.

$$w_i = w_r = w_t \quad (1.40)$$

ayrıca (1.38) eşitliğinde  $t=0$  durumunda (1.40) denklemindeki ki frekans eşitliği kullanılırsa,

$$\vec{k}_i \vec{r} = \vec{k}_r \vec{r} = \vec{k}_t \vec{r} \quad (1.41)$$

eşitliği elde edilir. (1.41) eşitliğindeki ilk iki terimden;

$$k_i r \sin \theta_i = k_r r \sin \theta_r \quad (1.42)$$

eşitliği elde edilir. Gelen ve yansıyan ışık aynı ortamda yayılır. Dolayısıyla bu iki ışık dalgasının dalga vektörleri birbirine eşittir. Dalga vektörlerinin eşit olmasından dolayı, gelen ve yansıyan ışığın, yüzeyin normali ile yaptığı açı eşit olur. Bu ise yansıma yasası olarak bilinir ve

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.43)$$

şeklinde ifade edilir. Aynı şekilde (1.41) eşitliğinden gelen ışık dalgası ve kırılan ışık dalgası mukayese edilirse,

$$k_i r \sin \theta_i = k_t r \sin \theta_t \quad (1.44)$$

eşitliği elde edilir ve bu ifade Snell yasası olarak bilinmektedir. (1.44) eşitliğindeki  $k_i$  ve  $k_t$  ifadeleri,

$$k_i = \frac{n_i \omega}{c} \text{ ve } k_t = \frac{n_t \omega}{c} \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilirse, Snell yasası;

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1.46)$$

haline dönüşür [54].

Manyetik olmayan ortamlar arasındaki bir arayüzde yansıyan doğal ışık her zaman az ya da çok polarize olur [55]. Düzlem polarize elektromanyetik dalganın elektrik alanı, genel olarak "s" ve "p" olarak adlandırılan iki ortogonal bileşene ayrıştırılabilir [49].

### 1.11.1. Işık Dalgasının s-Kutuplanması

Maxwell'in sınır koşul kuralları; gelen, yansıyan ve kırılan ışığa uygulanır ve  $\vec{E}$  ile  $\vec{B}$  alanlarının teğetsel bileşenlerinin yüzey sınırı boyunca sürekli olması ilkesi uygulanırsa;

$$\vec{E}_{0i} + \vec{E}_{0r} = \vec{E}_{0t} \quad (1.47)$$



$$\vec{B}_{0i} \cos \theta_i - \vec{B}_{0r} \cos \theta_r = \vec{B}_{0t} \cos \theta_t \quad (1.48)$$

şeklindedir.  $E$  ve  $B$ 'nin birbiriyle;

$$E = \frac{c}{n} B \quad (1.49)$$

şeklinde bir ilişkisi vardır. (1.49) ifadesi (1.48) ifadesi yerine yazılıp tekrar düzenlenirse;

$$n_i \vec{E}_{0i} \cos \theta_i - n_r \vec{E}_{0r} \cos \theta_r = n_t \vec{E}_{0t} \cos \theta_t \quad (1.50)$$

elde edilir ve  $\theta_i = \theta_r$  eşitliği (1.50) denkleminde kullanılırsa,

$$r_s = \frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (1.51)$$

ifadesi elde edilir burada  $r_s$  ifadesi s-kutuplanması için yansıma katsayısıdır. Aynı işlemler kırılan ışık için tekrarlandığında s-kutuplanması için geçirgenlik katsayısı eşitlik (1.52) ile ifade edilir [52, 56].

$$t_s = \frac{\vec{E}_{0t}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (1.52)$$

### 1.11.2. Işık Dalgasının p-Kutuplanması

Işığın s-kutuplanması modunda yüzeye gelen ışığın elektrik alan ( $\vec{E}$ ) bileşeni yüzeye dik iken, p-kutuplanması (TM) modunda ise manyetik alan ( $\vec{B}$ ) bileşeni yüzeye diktir. Burada yansıma ve geçirme katsayılarını bulmak için  $\vec{E}$  ve  $\vec{B}$ 'nin paralel bileşenleri Maxwell'in yüzey boyunca süreklidir şartı kullanılırsa [56];

$$-\vec{B}_{0i} + \vec{B}_{0r} = \vec{B}_{0t} \quad (1.53)$$

$$\vec{E}_{0i} \cos \theta_i - \vec{E}_{0r} \cos \theta_r = \vec{E}_{0t} \cos \theta_t \quad (1.54)$$

ifadeleri elde edilir. s-kutuplanma modu için gerçekleştirilen yansıma ve geçirme katsayısı hesaplamaları p-kutuplanma modu için de gerçekleştirilir;

$$r_p = \frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (1.55)$$

ve

$$t_p = \frac{\vec{E}_{0t}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (1.56)$$

sonucuna varılır. (1.51), (1.52), (1.55) ve (1.56) eşitlikleri Fresnel denklemleridir. Bu eşitlikler Snell yasasından faydalanılarak tekrar düzenlenirse;

$$r_s = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.57)$$

$$t_s = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.58)$$

$$r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.59)$$

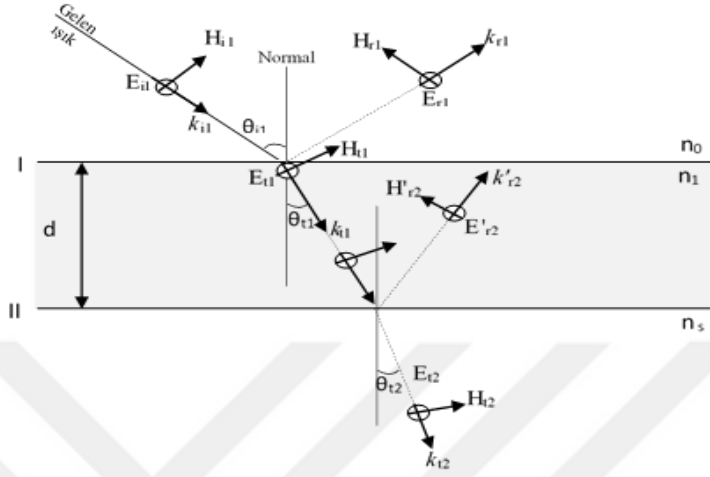
$$t_p = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (1.60)$$

şekline dönüşür [56].

## 1.12. Transfer Matris Metodu

Transfer matris yöntemi, çok katmanlı dielektrik ortamlardan ışık yayılımının analizinde kullanılan güçlü bir araçtır. Bu yöntemle bir konumdaki elektrik veya manyetik alanların bir transfer matris yoluyla diğer konumlardaki alanlarla ilişkili olabileceğini ifade eder [57]. Bu yöntem, 2x2 matrislerin çarpımı ile çok katmanlı ortamdaki elektromanyetik alanların kesin ve verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlar [58]. Ayrıca çok katmanlı bir yapının yansıma ve geçirgenliği, transfer matris yöntemi kullanılarak hesaplanabilir [59]. Elektrik ve manyetik alanların teğetsel bileşenleri gibi transfer matris yöntemi de Maxwell denklemlerinin süreklilik koşuluna dayanmaktadır yani bir tabakanın başlangıcında alan

biliniyorsa tabakanın sonundaki alan da basit bir matris işlemiyle elde edilebilir [54]. Yöntemin son aşamasında, matris sistemi yansıtıcılık ve geçirgenlik katsayılarına dönüştürülür.



Şekil 17. Yüze gelen ışık dalgasına ait sınırdaki alanlar

Şekil 17'de gösterildiği gibi, iki şeffaf ortam arasında ince bir dielektrik film üzerine doğrusal polarize bir ışık dalgası geldiğini göz önünde bulunduralım. Her bir dalga  $E_{r1}$ ,  $E'_{r2}$ ,  $E_{t2}$  ve benzeri bu yönde hareket eden tüm olası dalgaların bileşkesini temsil etmektedir. I sınırında [54].;

$$E_1 = E_{i1} + E_{r1} = E_{t1} + E'_{r2} \quad (1.61)$$

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{i1} - E_{r1}) n_0 \cos \theta_{i1} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{t1} - E'_{r2}) n_1 \cos \theta_{i2} \quad (1.62)$$

Manyetik olmayan ortamda,  $E$  ve  $H$ 'i, kırılma indisi ve birim yayılma vektörü ile birbirine bağlayan,

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n \hat{k} \times E \quad (1.63)$$

II sınırında;

$$E_2 = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \quad (1.64)$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{i2} - E_{r2}) n_1 \cos \theta_{i2} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_{t2} n_s \cos \theta_{t2} \quad (1.65)$$

$n_s$  altlığın kırılma indisidir. İnce tabakayı bir kez geçen dalga, faz bakımından  $k_0(2n_1d\cos\theta_{i2})/2$ 'lik bir kaymaya uğrar. Bu kayma  $k_0h$  ile gösterildiğinde,

$$E_{i2} = E_{t1} e^{-ik_0h} \quad (1.66)$$

ve

$$E_{r2} = E_{r2} e^{+ik_0h} \quad (1.67)$$

olur. Böylece,

$$E_2 = E_{t1} e^{-ik_0h} + E'_{r2} e^{+ik_0h} \quad (1.68)$$

$$H_2 = (E_{t1} e^{-ik_0h} + E'_{r2} e^{+ik_0h}) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 \cos \theta_{i2} \quad (1.69)$$

eşitlik (1.68) ve (1.69) ile verilen bağıntılardan  $E_{t1}$  ve  $E'_{r2}$  çözümlenip eşitlik (1.61) ve (1.62) ifadelerinde kullanılırsa;

$$E_1 = E_2 \cos k_0h + H_2 (i \sin k_0h) / \gamma_1 \quad (1.70)$$

$$H_1 = E_2 \gamma_1 i \sin k_0h + H_2 \cos k_0h \quad (1.71)$$

elde edilir. Burada;

$$\gamma_1 \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 \cos \theta_{i2} \quad (1.72)$$

E gelme düzleminde olduğunda, yukarıdaki hesaplamalarla bu kez,

$$\gamma_1 \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 / \cos \theta_{i2} \quad (1.73)$$

olmak üzere benzer denklemler elde edilir. (1.70) ve (1.71) eşitliklerini matris biçiminde gösterirsek,

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_0 h + (i \sin k_0 h) / \gamma_1 \\ \gamma_1 i \sin k_0 h + \cos k_0 h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (1.74)$$

veya

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (1.75)$$

şeklinde yazılır. Karakteristik  $M_1$  matrisi, ardışık iki sınırdaki alanları birbirine bağlar. Buna göre altlık üzerine, üst üste binen iki film kaplanırsa üç sınır ve arayüzey olur ve bu durumda;

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (1.76)$$

olur. Bu bağıntının iki yanını  $M_1$  ile çarpılarak

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (1.77)$$

elde edilir. Genel olarak, her biri belirli bir  $n$  ve  $h$  değerine sahip tabakaların sayısı  $p$  ise, ilk ve son sınırlar,

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_p \begin{bmatrix} E_{(p+1)} \\ H_{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (1.78)$$

ile birbirine bağlıdır. Bütün sistemin karakteristik matrisi,  $2 \times 2$ 'lik matrislerin (doğru sırada) çarpımının sonucudur, yani,

$$M = M_1 M_2 \dots M_p = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (1.79)$$

şeklindedir. Bunların hepsinin birbirleriyle nasıl uyum içinde olduğunu görmek için, yukarıdaki yöntem kullanılarak, genlik, yansıtıcılık ve geçirgenlik katsayılarını veren bağıntılar elde edilecektir. Eş. (1.75) sınır şartları Eş. (1.61), Eş. (1.62) ve Eş. (1.64) kullanılarak yeniden düzenlenip

$$\gamma_0 \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta_{i1} \quad (1.80)$$

ve

$$\gamma_s \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_s \cos \theta_{t2} \quad (1.81)$$

olarak alınırsa,

$$\begin{bmatrix} E_{i1} + E_{r1} \\ (E_{i1} + E_{r1})\gamma_0 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} E_{t2} \\ E_{t2}\gamma_s \end{bmatrix} \quad (1.82)$$

elde edilir. Matrislerle işlem yapıp,

$$r = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} \quad \text{ve} \quad t = \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \quad (1.83)$$

alındığında bu son eşitlik,

$$1 + r = m_{11}t + m_{12}\gamma_s t \quad (1.84)$$

$$(1 - r)\gamma_0 = m_{21}t + m_{22}\gamma_s t \quad (1.85)$$

haline dönüşür. Sonuç olarak r ve t terimleri için sırasıyla şu ifadeler elde edilir:

$$r = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} - m_{21} - \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (1.86)$$

ve

$$t = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (1.87)$$

Kaplanan filmlerin herhangi bir konfigürasyonunda  $r$  veya  $t$ 'yi bulmak için her tabakanın karakteristik matrisini hesaplayıp onları çarparak bulunan matrisin elemanlarını yukarıdaki denklemlerde yerine koymak yeterlidir [54]. Yansıma ve kırılma katsayılarının sanal kısımları  $r^*$  ve  $t^*$  olmak üzere yansıtıcılık ve geçirgenlik sırasıyla  $R=|r|^2=rr^*$  ve  $T=(\gamma_s/\gamma_0)tt^*=1-R$  şeklinde ifade edilir [60].

Elektrik alanın geliş düzleminde farklı kutuplanmaya sahip olması teoride birtakım değişiklik yapılmasını gerektirir.  $E$ 'nin,  $B$ 'nin orijinal doğrultusu ile aynı yönde seçildiğini ve  $B$ 'nin de buna uygun olarak aynı dalga yönünü vermesi için döndürüldüğünü varsayarsak;

$$\vec{E} \perp \text{ ise } \gamma_1 = n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} \quad (1.88)$$

$$\vec{E} \parallel \text{ ise } \gamma_1 = n_1 \frac{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}{\cos \theta_{t1}} \quad (1.89)$$

olur. Işık arayüzeye dik olarak geliyorsa  $E \perp$  ve  $E \parallel$  ifadeleri birbirine eşit olur. Işık arayüzeye eğimli olarak geliyor ise sonuçlar ışığın her bir kutbu için ayrı hesaplanmalıdır. Işığın yüzeye dik gelmesi pratikte en sık karşılaşılan durumdur. Bu teoriyi ışık demetinin bütün arakesit yüzeylerine dik veya dikliğe yakın olarak geldiğini varsayarsak transfer matrisin elemanları aşağıdaki şekli alır [50].

$$m_{11} = m_{22} = \cos \delta \quad (1.90)$$

$$m_{12} = \frac{i \sin \delta}{n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (1.91)$$

$$m_{21} = i n_1 n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sin \delta \quad (1.92)$$

Bu ifadeleri kullanarak yansıma katsayısı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$r = \frac{n_1(n_0 - n_s) \cos \delta + i(n_0 n_s - n_1^2) \sin \delta}{n_1(n_0 + n_s) \cos \delta + i(n_0 n_s - n_1^2) \sin \delta} \quad (1.93)$$

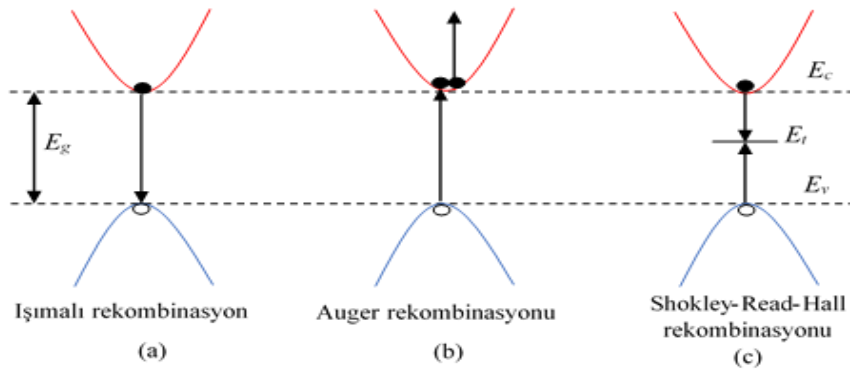
Yansıma parlaklığını belirleyen yansıma oranı ise  $R=|r|^2=rr^*$  şeklinde tanımlıdır. Bu ifadeyi kullanarak dik gelme durumu için filmin yansıtıcılığı ve geçirgenliği ( $T=1-R$ ) sırası ile aşağıdaki şekilde yazılır [50].

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 \delta}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \delta} \quad (1.94)$$

$$T = \frac{4n_0 n_s}{(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} + n_1\right)^2 \sin^2 \delta} \quad (1.95)$$

### 1.13. Yarıiletkenlerde Rekombinasyon ve Yüzey Pasivasyonu

Rekombinasyon, değerlik bandındaki bir elektronun bir foton soğurulması yoluyla iletim bandına uyarılarak kararsız hale gelmesi ve bir süre sonra tekrar değerlik bandına geri dönerek elektronun uyarılması ile meydana gelen delikle tekrar birleşmesi olayıdır. Elektronların valans bandından iletim bandına uyarılması, elektron-delik çiftinin oluşumu olarak adlandırılır ve hem iletim bandında meydana gelen serbest bir elektron hem de değerlik bandında oluşan bir delik foto akımına katkıda bulunabilir [61]. Rekombinasyon kayıpları güneş hücrelerinin performansının düşmesine neden olur. Bu nedenle rekombinasyon mekanizmalarını anlamak ve güneş hücrelerini buna göre tasarlamak önemlidir. Işımalı, Auger ve Shockley-Read Hall (SRH) olmak üzere üç tip rekombinasyon olayı [62] ve her bir rekombinasyon olayının kendi rekombinasyon oranı, azınlık yük taşıyıcısı ve yaşam süresi ( $\tau$ ) vardır. Şekil 18 güneş hücresindeki olası rekombinasyon mekanizmalarını göstermektedir.



Şekil 18. Güneş Hücrelerindeki (a) Işımalı (b) Auger ve (c) Shockley-Read-Hall rekombinasyon mekanizmaları



Auger ve ışımali rekombinasyonu, önlenemeyen ve böylece güç dönüşüm verimliliğini sınırlayan içsel rekombinasyon mekanizmalarıdır [63].

### **1.13.1. Işımalı Rekombinasyon**

Işımalı rekombinasyonu genellikle GaAs ve InAs gibi III-V grubundaki direkt bant aralığına sahip yarı iletkenlerde meydana gelmektedir. Bu rekombinasyon mekanizmasında elektronlar ve delikler doğrudan birleşir ve bir foton yayar (Şekil 18(a)). Yayılan foton, bant boşluğuna benzer bir enerjiye sahiptir ve bu nedenle sadece yarı iletkenden çıkabilecek şekilde zayıf bir şekilde soğurulur. Işık yayan diyottan (LED) üretilen ışık, bu rekombinasyon olayı için iyi bir örnektir. Silisyum ve Germanyum gibi indirekt bant aralığına sahip yarı iletkenlerde bu durum ihmal edilebilir [64].

### **1.13.2. Auger Rekombinasyonu**

Auger rekombinasyonu, Şekil 18(b)'de gösterildiği gibi iletim bandının bir elektronunun değerlik bandının bir deliği ile birleşmesiyle ortaya çıkan enerjinin elektron-elektron etkileşimi yoluyla, iletim bandının yüksek enerjili bir duruma giren başka bir elektrona aktarıldığı üç parçacıklı bir işlemdir [65]. Auger rekombinasyonu, özellikle yüksek katkılı bölgelerde meydana gelir, çünkü rekombinasyon tarafından salınan enerji iletim bandında başka bir elektrona aktarılır. Hafif katkı durumunda, iletim bandındaki az sayıda elektron, Auger rekombinasyon olasılığını azaltır [66]. Yarı iletkenlerde katkılama, yüksek Auger rekombinasyon değerleri nedeniyle güneş hücresinin verimliliğini sınırlamamak için dikkatle düzenlenmelidir. Bir Auger mekanizmasının ayırt edici özelliği, elektronların ve deliklerin diğer elektronlardan ve deliklerden enerji alması ya da bunlara enerji vermesidir [67].

### **1.13.3. Shockley-Read Hall Rekombinasyonu (SRH)**

Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonunun şematik gösterimi Şekil 18(c)'de gösterilmiştir. Bu rekombinasyon olayı, yarı iletkenler de bulunan çeşitli kusurlar nedeniyle meydana gelen bir diğer rekombinasyon çeşididir. Serbest haldeki bir elektron yarı

iletkenlerdeki kusurlara sıkışabilir ve hareketli bir delikle yeniden birleşebilir, böylece mobil durumlarını kaybederek enerjilerini ısı ya da ışık olarak yayarlar [68].

#### 1.13.4. Yaşam Süresi

Bir elektron-delik çiftinin oluşumu ve rekombinasyonu arasındaki ortalama süreye lifetime (ömür-yaşam süresi) denir ve güneş hücreleri için daha yüksek verim sağladıkları için taşıyıcı yaşam sürelerinin uzun olması istenir. Azınlık taşıyıcının ömrü büyük ölçüde yarı iletken malzemenin rekombinasyon hızına bağlıdır. Yarı iletkenlerdeki taşıyıcıların yaşam süresi  $\tau_b$ , ışımali taşıyıcı yaşam süresi  $\tau_{rad}$ , Auger taşıyıcı yaşam süresi  $\tau_A$  ve SRH yaşam süresi  $\tau_{SRH}$ 'yi içermektedir ve

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (1.96)$$

şeklinde ifade edilir. Efektif yaşam süresi ise kütle ve yüzeylerdeki rekombinasyon işlemlerini yansıtır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{S_{front} + S_{back}}{d} \quad (1.97)$$

Burada,  $\tau_{bulk}$  yaşam süresi,  $d$  altlığın kalınlığı,  $S_{front}$  ve  $S_{back}$  ise sırasıyla ön ve arka yüzeylerin rekombinasyon hızlarını göstermektedir [69].

#### 1.14. Pasivasyon

Yüzey pasivasyonu, güneş hücresi teknolojisinde büyük önem taşımaktadır [70]. Güneş hücresi kalınlığının maliyete bağlı azalması nedeniyle yüzey/hacim oranı artmaktadır. Bu da yüzey pasivasyonunu güneş hücresi verimliliği için belirleyici bir faktör haline getirmektedir [71]. Yüzey pasivasyonu, altlık yüzeyindeki SRV (Surface Recombination Velocity, yüzey rekombinasyon hızı)'nin azaltılması ve böylece altlığın etkin ömrünün arttırılmasıdır. SRV'yi azaltmak için;

- Kimyasal pasivasyon: Altlık yüzeyinde uygun bir pasivasyon tabakasının biriktirilmesiyle birim alandaki durum yoğunluğunu ( $N_{st}$ ) azaltma yoluyla arayüzey durumlarının yoğunluk ve rekombinasyon etkinliğinin azaltılması,
- Alan etkisi pasivasyonu: Altlığın ön ve arka yüzeylerini uygun bir katkılama yoluyla veya sabit yüklere sahip uygun dielektrik film ile kaplayarak bir tip taşıyıcının (elektron veya delik) yoğunluğunun azaltılması

gibi yollar izlenebilir [72, 73].

Alan etkisi pasivasyonu yerleşik bir elektrik alan vasıtasıyla oluşturulabilir (ön ve arka yüzey alanı (BSF)). Kimyasal pasivasyonu ise ya Si yüzeyinde bulunan kusurlu durumlarının sayısının ( $D_{it}$ ) azaltılmasıyla ya da plazma biriktirme ile sağlanan hidrojen pasivasyonu veya azot ve hidrojen gaz karışımı ile tavlanması sonucunda gerçekleştirilir. Kimyasal pasivasyon hem n hem de p tipi c-Si için etkilidir, çünkü Si doymamış bağları doyurarak yüzey kusurlarını azaltır. Bu nedenle hem n hem de p-tipi c-Si bazlı güneş hücrelerinin dönüşüm verimlilikleri geliştirilebilir [74].

#### 1.14.1. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Azaltılması

SRV, yüzey kusurlarının temel özellikleri ile ilişkili olduğundan yarı iletken yüzeyin rekombinasyon aktivitesinin doğrudan bir ölçüsüdür ve bu nedenle bir yüzey pasivasyonunun kalitesinin değerlendirilmesine izin verir. SRV, (1.102) eşitliği ile ifade edilir ve bu eşitliğe göre SRV, arayüzey durum yoğunluğu ( $D_{it}$ ) ile doğru orantılıdır.  $D_{it}$  azaltma işlemi genellikle kimyasal pasivasyon olarak adlandırılır ve SRV,

$$n_1 \equiv n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \quad (1.98)$$

$$P_1 = \frac{n_i^2}{n_1} \quad (1.99)$$

$$S_{n0} \equiv \sigma_n v_{th} N_{st} \quad (1.100)$$

$$S_{p0} \equiv \sigma_p v_{th} N_{st} \quad (1.101)$$

olmak üzere,

$$U_S = (n_s p_s - n_i^2) x \int_{E_v}^{E_c} \frac{v_{th} D_{it}(E_t)}{[n_s + n_1(E_t)] \sigma_p^{-1} + [p_s + p_1(E_t)] \sigma_n^{-1}} dE_t \quad (1.102)$$

ile ifade edilir. Burada  $S_{n0}$  ve  $S_{p0}$  elektron ve boşlukların yüzey rekombinasyon hız parametreleri,  $n_s$  ve  $p_s$  yüzeydeki elektron ve boşluk yoğunluğu,  $n_1$  ve  $p_1$  denklemde verilen SRH yoğunlukları,  $\sigma_n$  ve  $\sigma_p$  elektron ve boşlukların kesit alanları (capture cross sections),  $N_{st}$  birim alandaki durumların yoğunluğu ve  $v_{th}$  termal hızı ifade etmektedir [75].

(100) doğrultusunda büyütülmüş saf bir Si yüzeyi,  $\text{cm}^2$  başına yaklaşık olarak  $7 \times 10^{14}$  yüzey atomundan oluşur [76] ve arayüzey durumu yoğunlukları pasifize olmayan yüzeyler üzerinde  $1 \times 10^{13} \text{cm}^2$  mertebesinde olacak şekilde ölçülür. Bununla birlikte bu sayı, uygun bir yüzey pasivasyon tabakasının kaplanması ile büyük ölçüde azaltılabilir.

Arayüzey durumlarının sayısını azaltmaya yönelik başka bir yöntem ise bir *HF* (hidroflorik asit) çözeltisi ile doğal oksit tabakasının kaldırılması ve son olarak Hidrojen ile temizlenmiş bir yüzey oluşturulmasıdır [77]. Numunenin *HF*'ye veya iyot/etanol solüsyonu gibi diğer bazı sıvılara batırılması durumunda, çok düşük  $D_{ii}$  nedeniyle SRV oldukça düşük olabilir. Yüzeyde farklı bir malzeme tabakası oluşturmak için ince bir film kaplama yöntemini kullanmadan önce ilk işlem adımı olarak malzemeyi *HF*'e daldırmak daha iyi bir çözüm olabilir. Bu da Si atomlarının yüzeyinde bağlar oluşturur.

#### 1.14.2. Yük Taşıyıcılarının Yüzey Yoğunluğunun Azaltılması

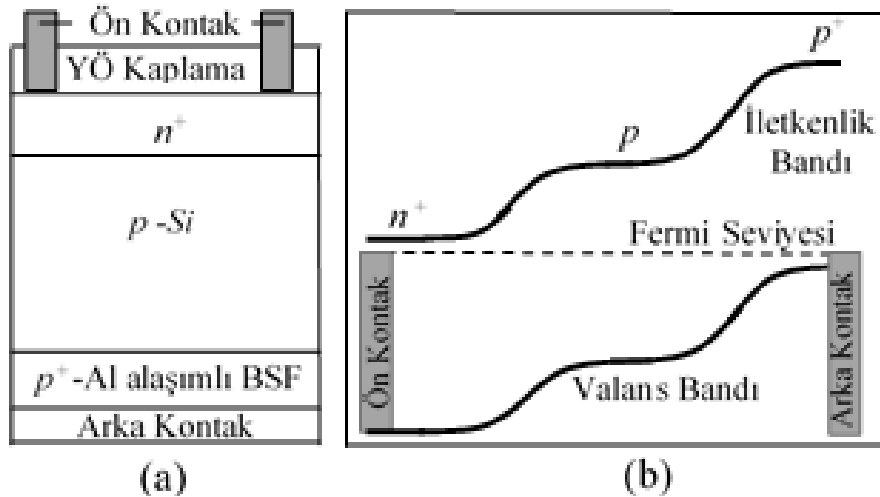
Bir SRH rekombinasyon olayı, bir elektronun ve bir deliğin aynı anda varlığını gerektirir ve bu nedenle rekombinasyon oranı en düşük konsantrasyona sahip olan taşıyıcı yük tarafından sınırlandırılacaktır. Bir elektrik alan vasıtasıyla yüzeydeki taşıyıcı yük konsantrasyonunu azaltarak SRV'nin önemli ölçüde azalmasını sağlayabilir. Bu elektrik alan, yüzeyin altındaki bir katkı profili veya yüzeydeki bir dielektrik tabakada ya da bir kapı elektrotunda elektrik yükleri uygulanarak oluşturulabilir.

Si güneş hücrelerinde, güneş hücresinin arkasındaki rekombinasyon kayıplarını azaltmak için yüksek-düşük (aynı polarite) difüz edilmiş katkı profili kullanılır. P tipi temel malzemenin arka yüzeyine metal kontaklardan olan *Al*'nin kaplanarak difüze edilmesiyle oluşturulur ve arka yüzey alanı (BSF) olarak adlandırılır. p-n eklemının kendisi de ışıkla taşıyıcı yüklerin ayrılmasına ilaveten yüzeyin pasivasyonunu sağlayabilir [73].

En yaygın bağlanma türü olan kimyasal bağlanma ile pasivasyon en saf haliyle atomik veya moleküler türlerin yarı iletken yüzeyindeki silisyum atomlarının doymamış bağlarına kimyasal olarak bağlanmasını ifade eder. Arayüzey kusurları genellikle bir oksidasyon ya da silisyum altlık üzerine başka bir malzemenin büyütülmesi sonucunda oluşur. Bu kusur veya tuzakların  $D_{it}$  yoğunluğu pasivasyon işlemi ile çok önemli ölçüde azaltulabilir. Pasivasyon malzemesi olarak genellikle  $SiN_x$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , ve  $Ga_2O_3$  vb kullanılır [76].

### 1.15. Arka Yüzey Alanı (BSF)

Yüzey rekombinasyon kayıplarının en aza indirilmesi, yüksek verimli güneş hücrelerinin geliştirilmesi için çok önemlidir [78]. Geleneksel bir silisyum güneş hücresinin arkasında potansiyel bir bariyerin bulunması rekombinasyonu minimuma indirgeyerek açık devre voltajını ( $V_{OC}$ ) ve kısa devre akımını ( $I_{SC}$ ) artırır, böylece hücrenin performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Hücre performansında önemli bir iyileşme sağlamak üzere  $n^+/p/p^+$  yapısının böyle bir etki elde etmek için taban bölgesindeki azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğunun taban kalınlığını aşması gerekir [79]. Al-alaşımli BSF'nin şematik gösterimi ve BSF'nin enerji bant diyagramı Şekil 19'da gösterilmektedir.



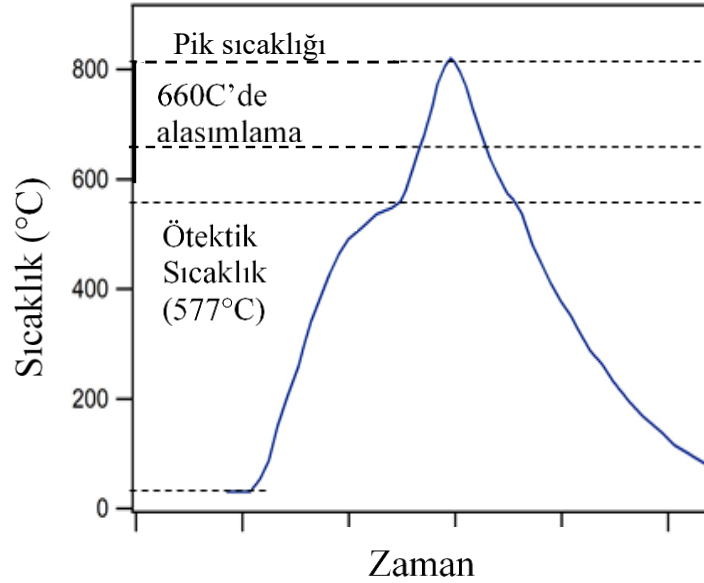
Şekil 19. Al-alaşımli BSF'ye sahip tipik bir p-tipi c-Si güneş hücresinin şematik gösterimi (a), BSF'nin enerji bant diyagramı (b)

BSF'nin işlevi, taşıyıcı yükleri hücreye geri iten bir ayna gibi davranmasıdır [80]. Genel olarak, arka yüzeyi pasifleştirmenin bu etkisi, ticari hücre yapılarında orta düzeyde

bir BSF oluşturan silisyum ile serigrafi baskılı Al macununun alaşımlanmasıyla gerçekleştirilir. Pasivasyon performansını değerlendirmek için bir parametre olan efektif arka yüzey rekombinasyon hızı (SRV), Bor-BSF hücreleri için 80-200 cm/s aralığında olabilirken, Al-BSF hücrelerinin efektif arka SRV'si 260-700 cm/s olarak kaydedilmiştir [81]. 200 cm/sn'lik bir arka yüzey rekombinasyon hızı, 20 µm üzerinde kalın bir Al tabakası basılarak ve 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 1-5 dakika tavlanaarak elde edilebilir [78]. Ancak, bu işlem, ince alt tabakalar kullanıldığında düşük mekanik verimle ilgili bir sorun olan altlığın bükülmesine neden olur [82].

Tavlama işlemini optimize etme gerekliliğini beraberinde getiren bu gibi durumlarda Al miktarının azaltılması önemlidir. Bu nedenle, basılan Al macun miktarına bağlı olarak optimal tavlama sıcaklığını ve etkilenen parametreleri tahmin etmek faydalı olabilir. Ayrıca Ag/Si ön kontaklar ve Al/Si'un alaşımlama işlemi için tavlama işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilir.

Eşzamanlı tavlama işlemi sırasında altlıklar Şekil 20'de gösterilene benzer belirli bir sıcaklık profili ile hızlı bir işleme tabi tutulur. Tavlama işlemi ile Al-Si alaşımlanması Al-Si faz diyagramına göre gerçekleştirilir [82]. 577°C sıcaklıkta Al, silisyum ile ötektik bir alaşım oluşturur.



Şekil 20. Eşzamanlı tavlama işlemi için sıcaklık profili

Al'nin Silisyum ile alaşım işlemi, temas eden bölgeler boyunca Al'nin silisyuma difüzyonu ile yaklaşık 660°C'de lokal olarak başlar. Al'nin silisyuma nüfuz etmesi, sıcaklığın

daha da artmasıyla gerçekleşir ve yatay olarak genişleyen lokal sivri uçlar meydana getirir. Epitaksiyel kristalleşme silisyumun soğuması sırasındaki tepkisiyle meydana gelir ve silisyum belli bir çözünürlük sınırında Al ile katkılanır böylece p<sup>+</sup>-BSF tabakası meydana gelir [82-84]. 577°C ötektik sıcaklıkta silisyumun Al eriyiği içindeki çözünürlüğünün ağırlıkça %1.6'ya ulaştığı Al-Si ikili faz diyagramına göre elde etmek için yeterli Al-BSF tabakası kalınlığı gereklidir [85].

BSF kalınlığı teorik olarak eşitlik (1.103) ve (1.104) ile hesaplanabilir.

$$W_{BSF} = \frac{m_{Si}}{Ax\rho_{Si}} \quad (1.103)$$

$$m_{Si} = m_{Al} \left( \frac{F}{100-F} - \frac{E}{100-E} \right) \quad (1.104)$$

Burada  $m_{Si}$  çözünmüş silisyum kütlesi,  $m_{Al}$  kaplanmış Al kütlesi ve  $\rho_{Si}$ , silisyumun yoğunluğu, A numunenin yüzey alanı, F ve E sırasıyla tavlama sıcaklığındaki ve ötektik sıvıdaki Si kütlesinin yüzdesidir [86].

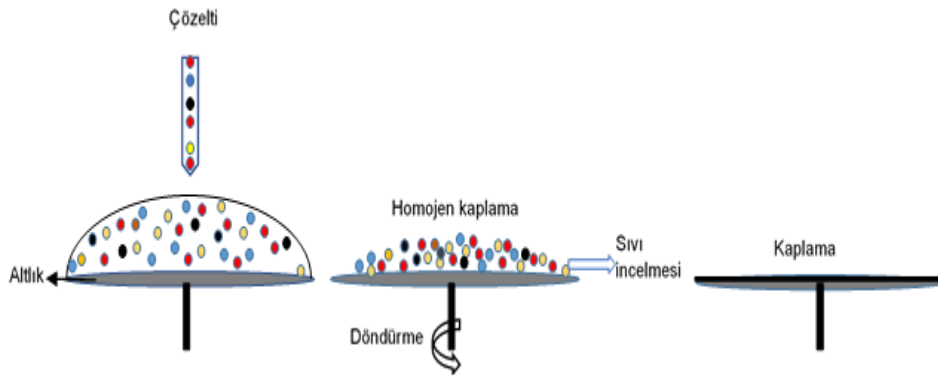
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Numune Hazırlama ve Karakterize Etmede Kullanılan Cihazlar

Numune üretiminde kaplama yöntemi olarak dönel kaplama yöntemi kullanıldı. Hazırlanan numunelerin hesaplama ve simülasyonlar dışında karakterizasyonları esas olarak X-ışını Kırınımı (XRD) ölçümleri, Spektrofotometre yansıma ölçümleri için UV-Visible ölçümleri, Yüzey morfolojisi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ölçümleri, kalınlık, kırılma indisi (n) ve dielektrik (k) sabiti gibi parametrelerin belirlenmesi için Elipsometri, taşıyıcı yaşam süresi ölçümleri için QSSPC ölçümleri ve Profilometre gerçekleştirildi.

#### 2.1.1. Dönel Kaplama

Dönel kaplama yöntemi, Şekil 21’de gösterildiği gibi taşıyıcının yatay olarak bir eksen etrafında döndürülürken üzerine solüsyon damlatılması ve solüsyonun merkezcil kuvvetin etkisiyle taşıyıcı yüzeyine yayılması esasına dayanmaktadır. Nihai film kalınlığı ve diğer özellikler çözelti özellikleri (viskozitesine, kuruma hızına, katı oranına ve yüzey gerilimleri) ile işlem şartlarına (devir, hızlandırma) bağlıdır. Dönel kaplama metodu biriktirme, döndürme, durdurma, buharlaştırma olmak üzere 4 aşamadan oluşmaktadır [87].



Şekil 21. Dönel kaplama tekniği şematik gösterimi

Kaplama aşamasında, dönecek yüzeye sabitlenmiş olan taşıyıcı üzerine solüsyon damlatılır. Başlangıçta durmakta olan taşıyıcı döndürülür. Dönme sırasında, taşıyıcı üzerine



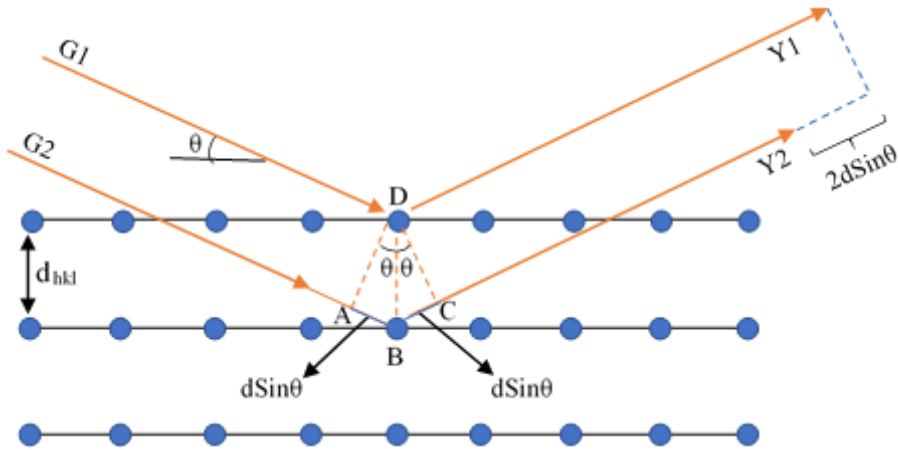
damlatılmış solüsyon merkezci kuvvetin etkisi ile taşıyıcının tüm yüzeyine yayılır. Dönme esnasında, filmin kalınlığı azalır ve uygun bir çözelti ile homojen dağılım olması beklenir. Bu dışı doğru olan merkezci kuvvet ile içe doğru olan viskozitenin neden olduğu sürtünme kuvvetinin birbirini dengelemesinden kaynaklanmaktadır [88]. Çözeltinin uygunluğuna göre hız, süre ve çözelti miktarı gibi parametrelerle kalınlık kontrolü kolaylıkla yapılabilmektedir. Ardından buharlaşma aşaması gelir. Taşıyıcı bu işlemten sonra kurutulur/fırınlanır.

### 2.1.2. X-ışını Kırınımı (XRD) Ölçümü

XRD analiz yöntemi x-ışınları ve madde elektronlarının etkileşiminin bir sonucu olarak kristaller tarafından x-ışınının saçılması esasına dayanır. Kırınım, gönderilen ışının dalga boyu ile kristalin yapısına bağlıdır. XRD'nin geometrik yorumu ilk kez Bragg tarafından yapıldı. Şekil 22 kırınım için geometrik koşul ve Bragg yasasının belirlenmesi hakkında ayrıntıları verir. Bragg, bir kristalde kırınımın olabilmesi için kristal üzerine gelen koherent monokromatik x-ışını demetini kullandı. Ardışık saçılma merkezlerinin x-ışınlarını yansıtan veya kıran paralel düzlem takımları ile temsil edilebileceğini gösterdi. Kübik sistemlerde düzlemler arası mesafe  $d(hkl)$  örgü sabiti olan ( $a$ ) ile doğru orantılıdır.

$$d_{(hkl)} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (2.1)$$

Saçılan x-ışınlarının yapıcı girişimi için ardışık düzlemlerden yansıyan demetlerin kristal yüzeyini terk ettikten sonra aynı fazda olmaları gerekmektedir [89].



Şekil 22. Bragg yasasının geometrik gösterimi

Bu şartlar altında, G1 ve G2 ile gösterilen demetler için, AB+BC toplamının gelen ışığın dalgaboyu olan  $\lambda$ 'nın tam katlarına eşit olması gerekir. Böylece;

$$AB+BC=n \lambda \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.2)$$

Burada n yansıma mertebesi olarak bilinmektedir. AB=BC olduğundan;

$$\sin\theta = \frac{AB}{d_{hkl}} \quad (2.3)$$

buradan;

$$AB=d_{hkl}\sin\theta \quad (2.4)$$

dır. Dolayısıyla;

$$n \lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.5)$$

ifadesi Bragg yasası olarak bilinir ve  $\lambda$  ile  $d_{hkl}$  için kırınımına uğrayan demetin açısal pozisyonunu tanımlar. Bragg yasası yalnızca, d düzlemler arası mesafe olmak üzere,  $\leq 2d$  olması halinde söz konusudur [89]. Bu çalışmada XRD ölçümleri için PANalytical X'Pert3 Powder modeli kullanıldı ve kullanılan sistem görsel olarak Şekil 23'te gösterildi.



Şekil 23. XRD ölçüm cihazı

### 2.1.3. UV-Visible Spektrofotometre

Morötesi-görünür bölge (UV-VIS) spektroskopisi, elektromagnetik spektrumun ultraviyole ve görünür bölgelerinde, moleküler bileşiklerin ve karmaşık iyonların nitel ve nicel analizlerinde kullanışlı bir tekniktir. Işığın örnekten geçtikten sonraki soğurma veya geçirgenliği incelenir. Sistem temel olarak ışık kaynağı ve detektörlerden oluşur. Kaliteli ışın elde etmek için çalışma bölgesine göre özel ışık kaynakları kullanılır. Görünür bölge çalışmaları için genellikle tungsten flamlar kullanılır. Tungsten flama lambaları çok parlak ve görünür bölgeden kızılötesi bölgeye kadar ışımaya yapabilen kaynaklardır. Ultraviyole soğurma çalışmaları için döteryum lambaları kullanılır. Döteryum lambalarında ışımının dalga boyu 185-375 nm arasında değişir. Hem ultraviyole hem de görünür bölge çalışmalarında ise ksenon ark lambaları kullanılır. Bu lambalar içerdiği ksenon nedeniyle sürekli ultraviyole ve görünür ışık yayar [90]. Bu çalışmada kaplanan malzemelerin mor ötesi ve görünür bölgedeki (190-1100 nm) yansıtma eğrileri Şekil 24'te gösterilen T70+ UV-Visible cihazı kullanılarak incelendi



Şekil 24. UV-visible spektrofotometre cihazı

### 2.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demetinden çıkan ışınların incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmelerin (elastik, elastik olmayan

çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda yüzey atomlarından saçılan elektronlar olan ikincil elektronları tespit ederek bilgilendirici görüntüler sağlayan bir görüntüleme tekniğidir. Odaklanmış bir elektron demetinden çıkan elektronların enerjisi genel olarak 200-300 eV' den 100 keV'e kadar değişebilir. Genellikle yüksek çözünürlük gerektiren analitik uygulamalar için kullanılır. Bu çalışmada, örneklerin yüzeyinin morfolojisini gözlemlemek için SEM görüntüleri Şekil 25'te gösterilen Zeiss EVO LS10 modeli ve A054 filamentli ile alındı.

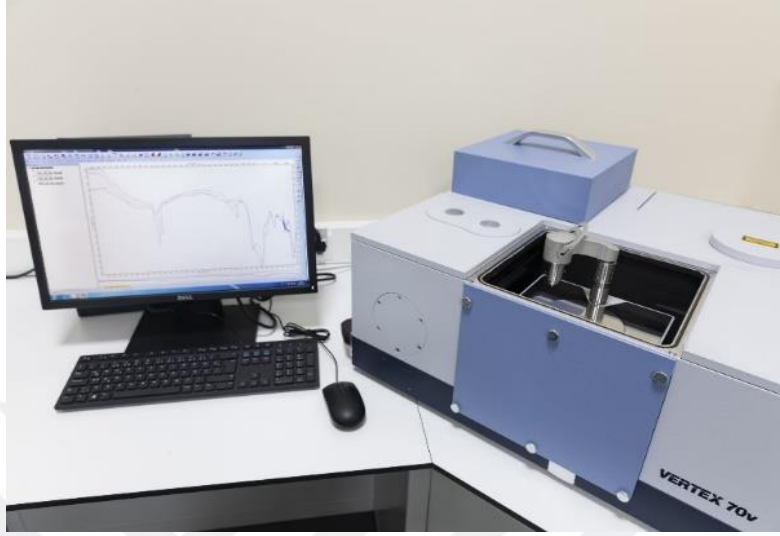


Şekil 25. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

### 2.1.5. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), kızılötesi radyasyon ışınlarını kullanarak malzemelerdeki fonksiyonel grupları (gaz, sıvı ve katı) tanımlamak için kullanılan bir tekniktir. Kızılötesi spektroskopisi, moleküldeki her bir bağ tarafından yapılan IR radyasyonunun soğurmasını ölçer ve sonuç olarak genellikle dalga sayısına ( $\text{cm}^{-1}$ ) karşı geçirgenlik (%) olarak adlandırılan spektrumu verir [91]. FTIR analizi, kızılötesi bölgedeki bir malzeme tarafından soğurulan dalga boylarının aralığını ölçer. Bu, kızılötesi radyasyonun (IR) bir malzeme üzerine gönderilmesiyle gerçekleştirilir. Malzemenin

moleküler bileşimini ve yapısını belirlemek için çeşitli dalga boylarında gönderilen kızılötesi ışığın enerjisinin ne kadar soğurulduğuna bakılır.



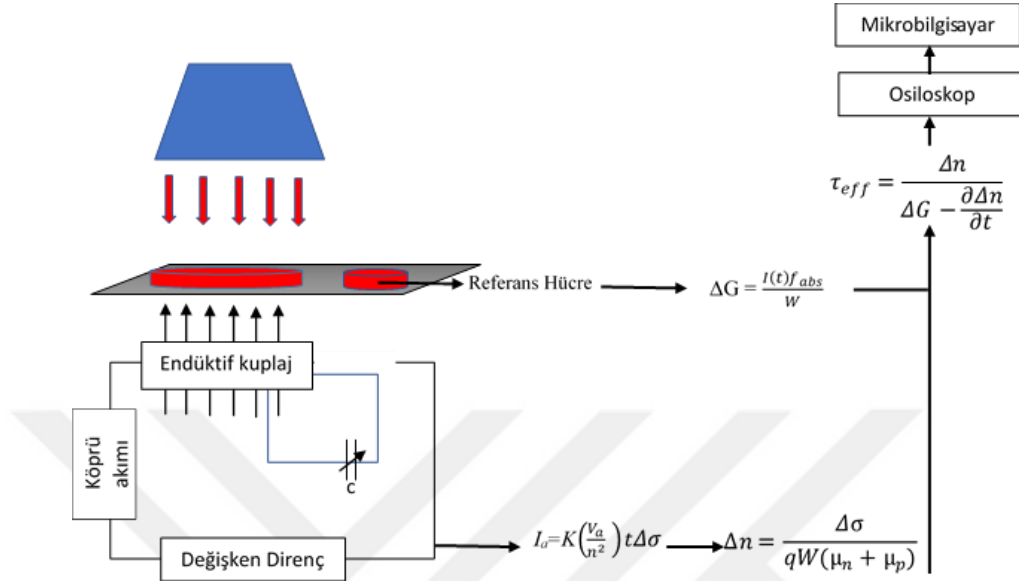
Şekil 26. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) cihazı

FTIR analizi, bilinmeyen malzemeleri, polimerler içindeki katkı maddelerini, bir malzeme üzerindeki yüzey kirliliğini ve daha fazlasını tanımlamak için kullanılabilir. Kızılötesi (IR) veya FTIR spektroskopisi küçük moleküllerin veya moleküler komplekslerin analizinden hücrelerin veya dokuların analizine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir [92]. Bu çalışmada FTIR ölçümleri için Şekil 26'da gösterilen  $50 \text{ cm}^{-1}$ - $6000 \text{ cm}^{-1}$  spektral aralığında çalışabilen, ultra geniş aralıkta beamsplitter ve geniş aralıkta DLaTGS detektörlerine sahip VERTEX 70v modeli kullanıldı.

### 2.1.6. Yarı Kararlı Foto İletkenliği (QSSPC)

Taşıyıcı yaşam süresi ölçümleri genellikle QSSPC ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Ayrıca, bu cihazla direnç ve doyma akımı ölçümleri de gerçekleştirilebilmektedir. Bu cihazın en önemli bileşenleri flaş lambası, radyo frekansı köprüsü, osiloskop ve kızılötesi filtre, optik filtreler ve bilgisayar olarak sıralanabilir [93]. Şekil 27'de QSSPC cihazı şematik olarak gösterildi. Çalışma prensibi olarak QSSPC, numunenin geçirgenliğindeki değişiklikleri ve dolayısıyla numunenin bir bobin ile bir radyo frekans köprüsüne bağlanması yoluyla iletkenliğini tespit eder. Ölçme işlemi, çoğunluk

taşıyıcı yükleri oluşturmak ve iletkenliği artırmak için kısa bir süre için flaş altında aydınlatma ile başlar, flaş bittikten sonra iletkenlik tekrar azalır.



Şekil 27. Taşıyıcı yaşam süresini ölçmek için endüktif olarak bağlanmış foto iletkenlik aparatının şeması [94].

QSSPC ölçümünde üretim hızını kısa sürede sabit tutmak için geçici ölçümlere göre nispeten daha uzun flaş kullanılır. Sistem bir radyo frekansı (RF) jeneratörü ile birleştirilmiş bobin aracılığıyla zaman içinde iletimi kaydeder ve eşitlik 2.6 kullanılarak uygulanan foto iletkenlik değişikliğinden kaynaklanan çoğunluk taşıyıcı yük yoğunluğunu hesaplar.

$$\Delta\sigma = qW(\mu_n - \mu_p)\Delta n \quad (2.6)$$

Burada  $\Delta\sigma$  fotoiletkenlik değişimini,  $W$  örnek kalınlığını,  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  sırasıyla elektron ve boşlukların hareketliliğidir. Efektif taşıyıcı yaşam süresi  $\tau_{eff}$  hesaplamaları ise;

$$\tau_{eff} = \frac{\Delta n}{\Delta G - \frac{\partial \Delta n}{\partial t}} \quad (2.7)$$

eşitliği kullanılarak elde edilir. Burada  $G$  çoğunluk taşıyıcı yüklerin fotoüretim oranıdır. Hesaplanan (İmplied) açık devre gerilim değeri ( $iV_{oc}$ ), aşağıdaki denklem aracılığıyla ölçülen verilerden de çıkarılabilir. Hesaplanan açık devre voltajı, numunenin mevcut durumunda elde edilebilecek maksimum  $V_{oc}$ 'yi gösterir.

$$iV_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{np}{n_i^2} \right) \quad (2.8)$$

Burada  $n$  ve  $p$  sırasıyla toplam elektron ve boşluk yoğunluğunu vermektedir.  $n_i$  asal taşıyıcı yoğunluğu,  $k$  Boltzmann sabiti ve  $T$  ise örnek sıcaklığıdır [95, 96].

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. HfO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Yansıma Önleyici Olarak İncelenmesi

Bu bölümde HfO<sub>2</sub> ince filmleri YÖ kaplama olarak detaylı bir şekilde incelendi. Hafniyum kaynağı olarak HfCl<sub>4</sub>, çözücü olarak etil alkol kullanıldı. Öncü deneyler için 0.05M'lik Hafniyum solüsyonu ile kalınlık, sıcaklık ve süre optimizasyonları yapılarak deneyler gerçekleştirildi. Daha sonra 0.05M ile 0.6M aralığında farklı oranlarda HfCl<sub>4</sub>'ün (Acros, %99 saflıkta) 5 ml etanol içerisinde çözünmesiyle farklı molaritelerde solüsyonlar hazırlandı. Hazırlanan solüsyonlar 24 saat dinlendirildikten sonra kaplama işleminde kullanıldı. Altlık olarak 725 µm kalınlığında ve yaklaşık 2cm×2cm ebadında CZ-Si kullanıldı. Altlıklar ultrasonik temizleyici kullanılarak etanol içerisinde 15 dk temizlenip hava ortamında kurutulduktan sonra tekrar ultrasonik temizleyicide saf su içerisinde 15dk temizlenip kurutuldu. C-Si yüzeyine HfO<sub>2</sub> ince filmlerini kaplama işlemi, solüsyonu altlık üzerinde homojen bir şekilde dağıtmak için ilk olarak 100 rpm'de 10 s (saniye) boyunca döndürülmesi ve ikinci aşama olarak solüsyonun numune üzerine kaplanmasını sağlamak için 1000~4000 rpm aralığında 20 s boyunca döndürülmesi ile gerçekleştirildi. Dönel kaplamadan sonra altlıklar 400°C de 3 dk tutularak ilk ısı işleminden geçirildikten sonra sıcaklık optimizasyonu yapmak için 500°C'den 1000°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda tavlama işlemi gerçekleştirildi. Tavlama sıcaklığı ve molarite optimizasyonu deneylerinde tavlama süresi 60 dk olarak uygulandı. Sıcaklık optimizasyonundan sonra tavlama süresi optimizasyonu 30 dk'dan 180dk'ya kadar 30 dk'lık adımlarla gerçekleştirildi. Son olarak kalınlık optimizasyonu için dönel kaplama hızı 1000 rpm'den 500 rpm'lik adımlarla 4000 rpm'e kadar değiştirilerek deneyler yapıldı. Daha sonra ikili katman, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ve SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı yansıma önleyici ve pasivasyon etkili katmanların geliştirilmesi için SiO<sub>2</sub> solüsyonu optimize edilerek deneylere devam edildi. Spektrofotometre yansıma ölçümleri, elipsometre, XRD, SEM, FTIR spektrometresi ve taşıyıcı yaşam süreleri ölçümleri ile karakterizasyonlar gerçekleştirildi.

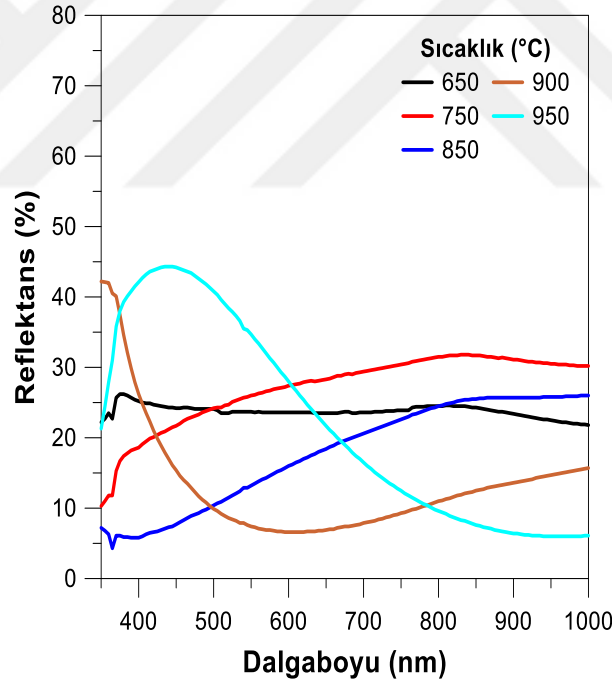


### 3.2. Tek katmanlı HfO<sub>2</sub> Yansıma Önleyici Kaplama

Bu kısımda hem fiziksel hem de optiksel özelliklerine göre farklı solüsyon uygulamaları göz önüne alınarak, düşük molariteli ve molarite optimizasyonunu da içeren yüksek molarite içerikli solüsyonları ve oluşturulan HfO<sub>2</sub> tek katmanlı YÖ kaplamaların karakterizasyonları, bulgular ve tartışmaları detaylı bir şekilde verilmektedir.

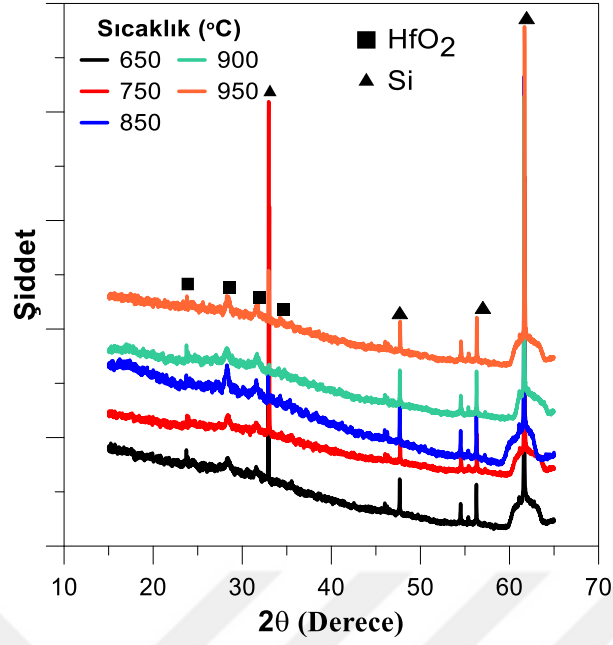
#### 3.2.1. HfO<sub>2</sub> İnce Filmler – Düşük Molarite

Hazırlanan 0.05M solüsyon ile öncü deneyler gerçekleştirilmiş olup, silisyum yüzeyinin 1500 rpm’de kaplanıp farklı sıcaklıklarda 150 dk tavllanması ile elde edilen yansıma grafikleri Şekil 28’de verilmiştir. Ayrıca minimum yansıma değerleri ve noktaları ile ortalama yansıma değerleri Tablo 3’te özetlenmektedir.



Şekil 28. 0.05M solüsyon ile hazırlanmış HfO<sub>2</sub> ince filmlerle kaplı silisyum yüzeylerin farklı sıcaklıklarda tavlandıktan sonraki yansıma grafikleri

900°C'nin altındaki sıcaklıklarda tek çukurlu yansıma grafiği elde edilemedi, ancak tavlama sıcaklığı 900°C ve 950°C'ye arttırıldığında sırasıyla %6.60 ve %6.00'lık minimum noktalar ile %13.27 ve %22.05 ortalama yansıma değerleri elde edildi.



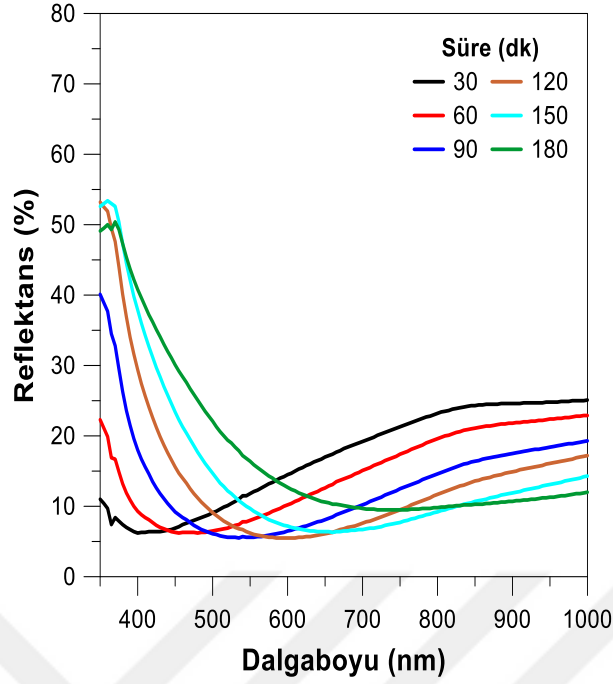
Şekil 29. 0.05M solüsyon ile hazırlanmış HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin XRD grafiği

Ayrıca elde edilen düşük molariteli HfO<sub>2</sub> ince filmlerine ait filmlerin XRD desenleri Şekil 29’da gösterildiği gibi pik pozisyonları 23.93°, 28.29°, 31.52° ve 34.36° olarak tespit edildi.

Tablo 3. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış 0.05M solüsyonla kaplı silisyum altlıkların yansımaya değerleri

Sıcaklık (°C)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
650	23.78	21.30	1000
750	27.05	10.30	350
850	17.88	4.30	365
900	13.27	6.60	602
950	22.05	6.00	965

Optimum tavlama sıcaklığı 900°C olarak belirlendikten sonra tavlama süresi 30 dk ile 180 dk aralığında değiştirilerek tavlama süresinin yansımaya özellikleri üzerindeki etkisi incelendi. Farklı sürelerde tavlanan filmlerin yansımaya grafikleri Şekil 30’da gösterilmektedir.



Şekil 30. 900°C farklı sürelerde tavllanmış 0.05M HfO<sub>2</sub> solüsyonu ile kaplı silisyum yüzeylerin yansımaya grafikleri

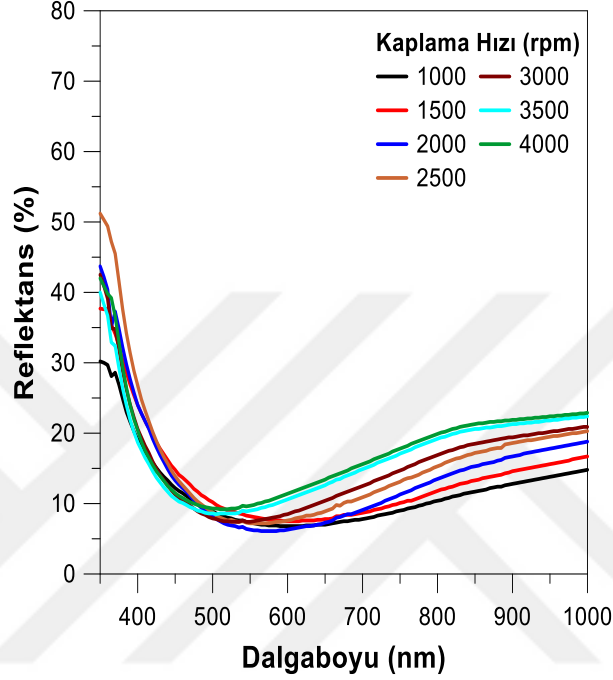
Elde edilen ince filmlere ait yansımaya değerleri Tablo 4'te özetlenmektedir. Tavlama süresi 30 dk ile 150 dk arasında olması durumunda minimum yansımaya değerlerinin %5.50 ile %6.30 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 180 dk'lık tavlamadan sonra ise minimum değer %9.50'ye kadar yükseldiği görüldü.

Tablo 4. 900°C farklı sürelerde tavllanmış 0.05M solüsyonla kaplı silisyum altlıkların yansımaya değerleri

Süre (dk)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
30	16.96	6.20	400
60	14.81	6.20	455
90	13.36	5.50	535
120	14.03	5.50	592
150	15.00	6.30	660
180	17.46	9.50	740

Minimum yansımaya gerçekleştiği dalga boyu ve ortalama yansımaya değerleri dikkate alındığında 90-120 dk aralığının tavlama süresi için uygun olduğu görülmektedir. Ancak 90 dk ve 120 dk için 3'er defa deney tekrar edildiğinde 120 dk'lık numunenin ortalama reflektans sonuçlarının daha iyi olduğu görüldü. Bu nedenle deneylere 120 dk tavlama süresi

dikkate alınarak devam edildi. Tavlama sıcaklığı (900°C) ve tavlama süresinin (120 dk) optimum değerleri elde edildikten sonra film kalınlığını ayarlayabilmek için Şekil 31’de görüldüğü gibi farklı hızlarda dönel kaplama yapılarak ortalama yansımının değerleri daha da düşürüldü.



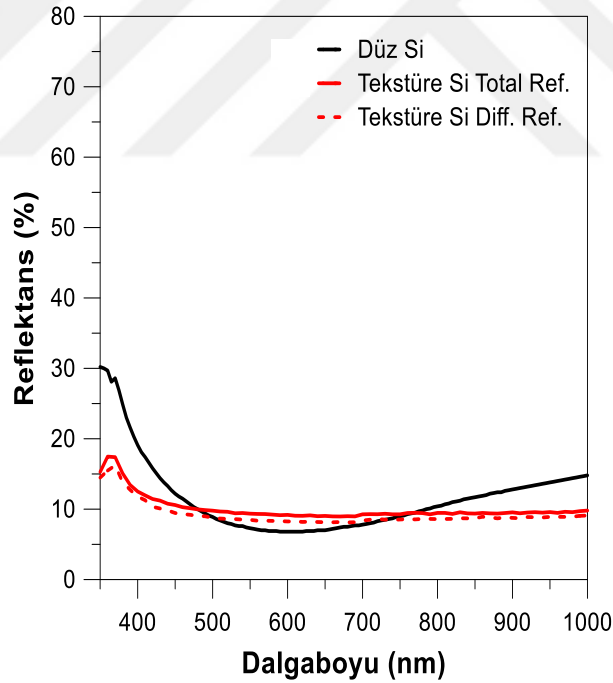
Şekil 31. Dönel kaplama hızına bağlı olarak ölçülmüş yansıma grafikleri

Dönel kaplama hızı ile kalınlık kontrolünün kısmi olarak kontrol edilebildiği görülmüştür. Bunun nedenlerinden biri olarak solüsyonun düşük molariteli olması gösterilebilir. Tablo 5’ten görüldüğü gibi 1000 rpm kaplama hızı ile oluşturulmuş filmlerde en düşük ortalama yansıma değeri ve minimum yansıma değeri sırasıyla %11.60 ve %6.80 olarak elde edildi. Bu sonuçlara göre dönel kaplama hızı düşürüldüğünde filmin kalınlaştığı ve kısmen daha iyi yansıma değerleri elde edildiği görüldü. 1000 rpm’den daha düşük kaplama hızlarında homojen kaplama yapılamadığından değerleri belirlenememiştir. Bu durum başlık 3.2.2’de detaylı olarak açıklanacağı üzere, sonraki çalışmalarda molarite yükseltılarak deneyler gerçekleştirildi.

Tablo 5. Dönel kaplama hızına bağlı olarak yansımaya değerleri

Kaplama Hızı (rpm)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
1000	11.60	6.80	605
1500	13.46	7.50	604
2000	13.93	6.10	575
2500	15.79	7.20	562
3000	15.44	7.40	538
3500	16.65	8.50	505
4000	17.56	9.20	515

Elde edilen optimum değerlerler kullanılarak tekstüre c-Si yüzeyine  $\text{HfO}_2$  ince filmi kaplanarak hem difüz hem de total yansımaya ölçümleri alındı. Tekstüre yüzey ile düz yüzeyde yansımaya grafikleri Şekil 32'de gösterildi. Ayrıca bu filmlere ait ortalama ve minimum yansımaya değerleri Tablo 6'da gösterilmektedir.

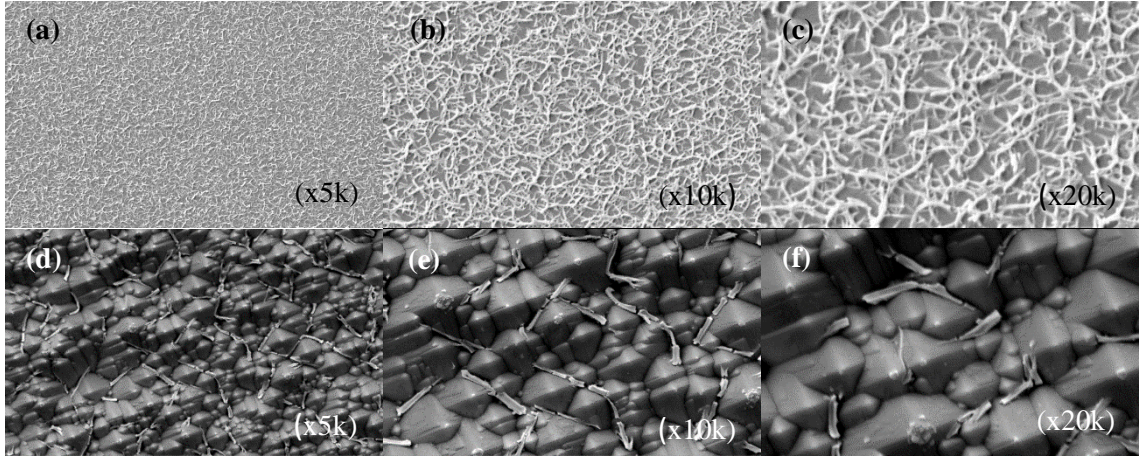
Şekil 32. 0.05M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan  $\text{HfO}_2$  ince filmlerinin yansımaya grafikleri

Tablo 6'dan görüldüğü gibi tekstüre c-Si yüzeyine kaplanan optimum  $\text{HfO}_2$  ince filmlerinin ortalama yansımaya değerleri düz c-Si yüzeyine kaplanan  $\text{HfO}_2$  ince filmlerine göre daha düşüktür.

Tablo 6. 0.05M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma değerleri

	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
Tekstüre c-Si Diff. Ref.	9.23	8.11	680
Tekstüre c-Si Total Ref.	10.07	8.96	670
Düz c-Si Ref.	11.60	6.80	605

Şekil 33'te 0.05M solüsyonu ile elde edilmiş HfO<sub>2</sub> ince filmlerin parlak ve tekstüre yüzeyli Si üzerindeki SEM görüntüleri verilmektedir. Parlak düz silisyum yüzeyinde ince filmin ağ yapısı şeklinde oluştuğu, tekstüre yüzeyde ise piramitler arasında kalıntılar halinde birikip film tabakasının oluşmadığı görülmektedir.

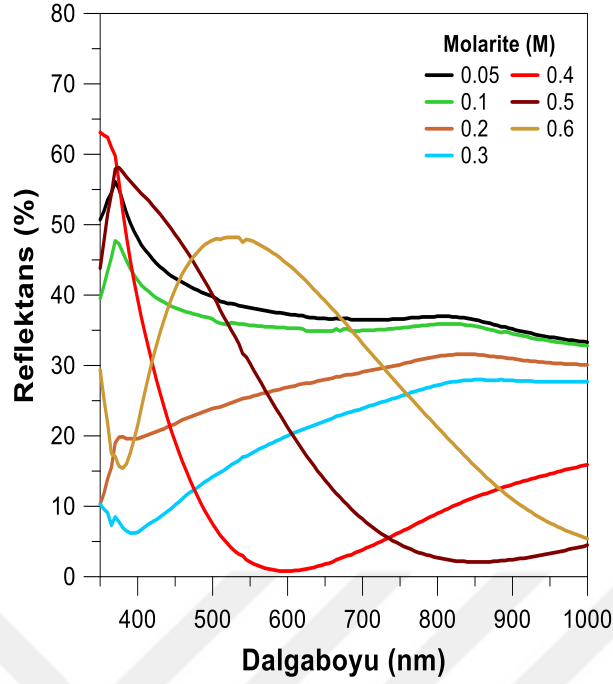


Şekil 33. 0.05M HfO<sub>2</sub> solüsyonu ile parlak düz (a-c) ve tekstüre (d-f) silisyum üzerine kaplanmış ve tavllanmış ince filmlerin SEM görüntüsü

Bu sonuçlar değerlendirilerek hem düz ve tekstüre yüzeylerdeki film kalitesini artırmak hem de yansıma değerlerini daha da azaltabilmek için daha yüksek molaritelerde solüsyonlar hazırlanarak deneylere devam edildi.

### 3.2.2. HfO<sub>2</sub> İnce Filmler – Yüksek Molarite

Farklı hafniyum molaritesi içeren (0.05M-0.6M) solüsyonla kaplanmış silisyum yüzeyine ait yansıma grafikleri Şekil 34'te verilmektedir. Ayrıca ortalama yansıma ( $R_{ort}$ , 350-1000 nm) ve minimum yansıma değerleri Tablo 7'de özetlenmektedir.



Şekil 34. Farklı molaritede hafniyum içeren solüsyonlarla kaplanmış silisyum yüzeyinin yansımaya grafikleri

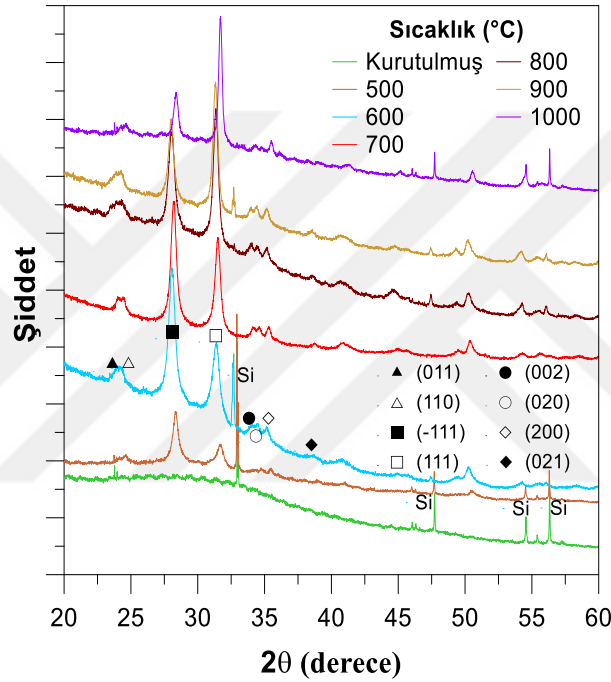
Minimum ve en düşük ortalama yansımaya değerleri 0.4M solüsyonu ile elde edildi. 350-1000nm aralığında ortalama yansımaya değeri %13.20 olarak hesaplandı. Minimum yansımaya değeri ise 598 nm'de %0.8 olarak ölçülmüştür. 0.5M ve 0.6M solüsyonları kullanıldığında, ortalama yansımaya değerinin yükseldiği ve minimum yansımaya değerinin yüksek dalga boylarına kaydığı görülmektedir.

Tablo 7. Molariteye bağlı olarak yansımaya değerleri

Molarite (M)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
0.05	38.68	33.30	1000
0.1	36.28	32.80	1000
0.2	27.00	10.30	350
0.3	20.69	6.20	398
0.4	13.20	0.80	598
0.5	20.08	2.10	855
0.6	28.40	5.40	1000

Bu sonuçlar ışığında deneylerde 0.4M solüsyonu kullanılarak tavlama sıcaklığı ve sıcaklığa bağlı kristallenme özellikleri araştırıldı. HfO<sub>2</sub> kaplı silisyum yüzeyinin sıcaklığa

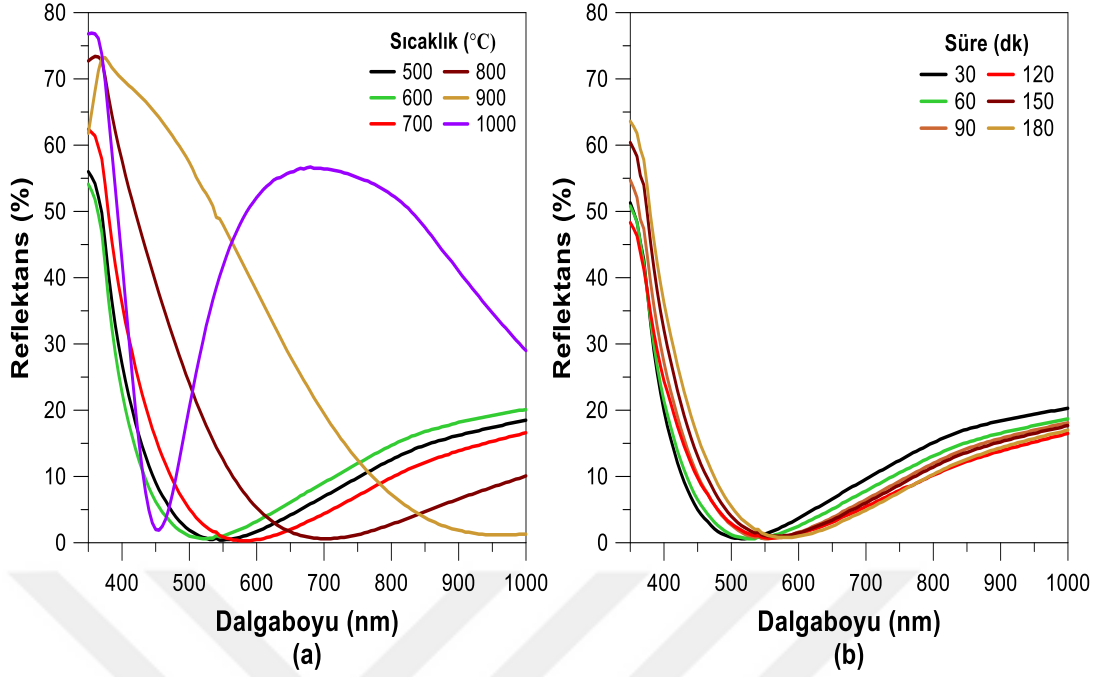
bağlı XRD ölçümleri ve pik pozisyonları Şekil 35’te verilmektedir (COD kart no: 96-400-1332). 500°C’de amorf fazdan kristal yapıya geçiş gözlenmektedir. Sıcaklığın artmasıyla kristallenmenin arttığı görülmekte ve monoklinik fazda kuvvetli pikler oluşmaktadır. Faz geçişi, kristal yapıya geçen atomların yeniden dizilişi için gerekli olan aktivasyon enerjisinin bir sonucu olabilmektedir [97]. Sıcaklığın artması ile kuvvetlenen pikler kristal boyutlarının büyüdüğünü göstermektedir. Karakteristik pikler 600°C ve daha yüksek sıcaklıklarda kuvvetli şekilde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 35. HfO<sub>2</sub> ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı XRD grafiği

Şekil 36(a)’da HfO<sub>2</sub> kaplı Si yüzeyinin tavlama sıcaklığına bağlı yansımaya grafiği verilmektedir. 700°C’den daha yüksek tavlama sıcaklıklarında ortalama yansımının arttığı görülmektedir. Tablo 8’de görüldüğü üzere tavlama sıcaklığı 700°C olduğunda  $R_{ort} = \% 12.73$  ve yansımının minimum noktasının 580 nm’de %0.30 olarak en iyi değeri elde edildi. Görünür ışık bölgesinde yansımının düşük olması aynı zamanda filmdeki kusurların az olduğu ve kristallenmenin iyi olduğu bilgisini vermektedir [98]. Tavlama süresinin yansımaya etkisi ise Şekil 36(b)’de verilmektedir. Ortalama yansımaya (%10.87) ve  $R_{Min}$  değerleri görünür ışık bölgesi dikkate alınarak değerlendirildiğinde 700°C’de 120 dk’nın optimum tavlama koşulu olduğu değerlendirildi.



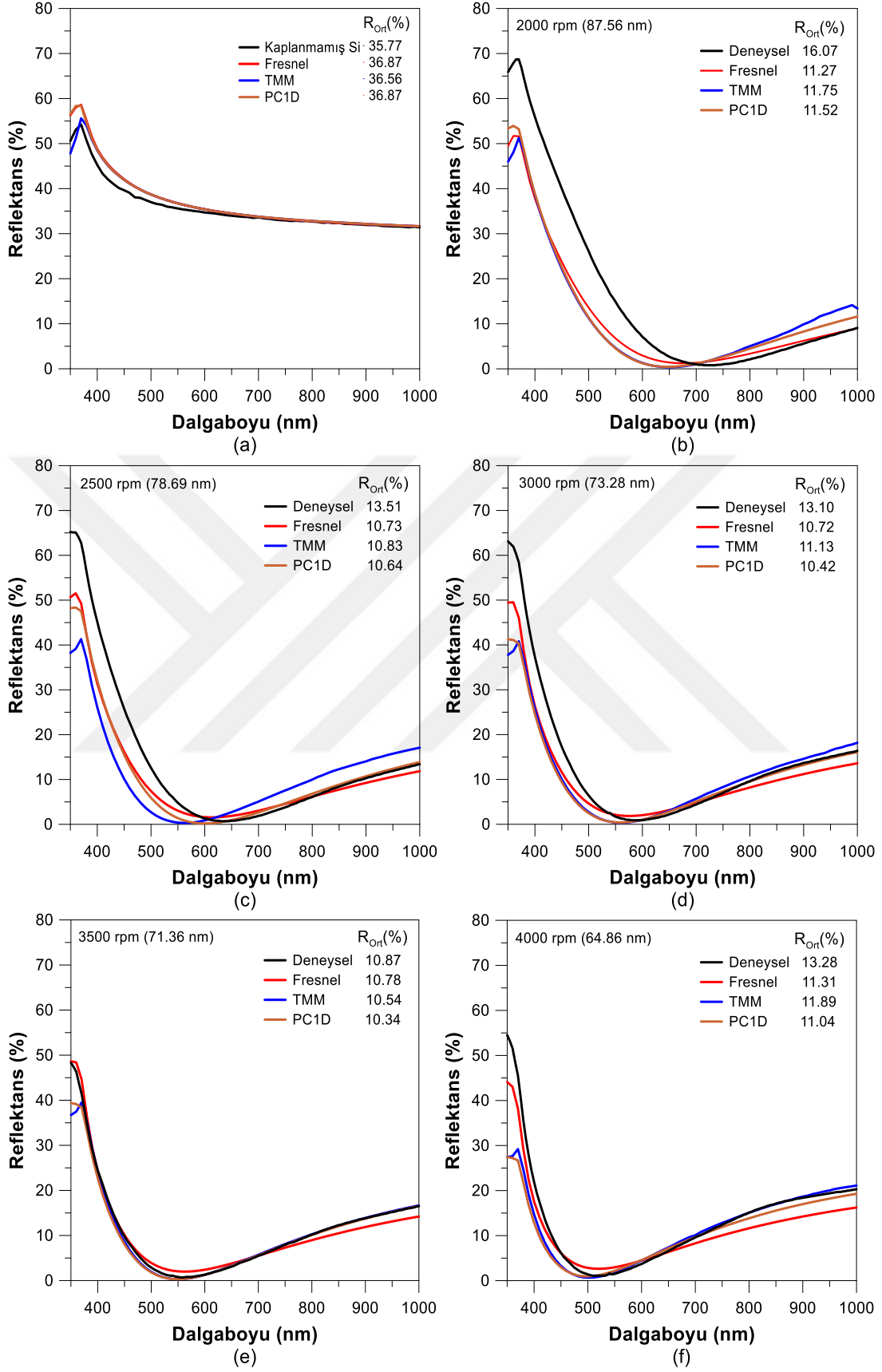


Şekil 36. HfO<sub>2</sub> ince film kaplı silisyum yüzeyinin tavlama sıcaklığına(a) ve 700°C de tavlama süresine(b) bağlı yansımaya grafikleri

Tablo 8. Tavlama sıcaklığı ve süresi değişimine bağlı olarak elde edilen yansımaya değerleri

Sıcaklık (°C)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)	Süre (dk)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
500	12.45	0.40	548	30	12.85	0.60	518
600	13.05	0.60	523	60	11.91	0.60	530
700	12.73	0.30	583	90	12.24	0.60	553
800	16.14	0.60	703	120	10.87	0.70	558
900	29.83	1.20	963	150	12.96	1.00	565
1000	42.91	1.90	455	180	13.17	0.80	578

Film kalınlığını optimize etmek için dönel kaplama hızı 2000 rpm ile 4000 rpm aralığında değiştirilerek filmler hazırlandı. Ölçülen yansımaya grafikleri, Şekil 37’de verildiği üzere, Fresnel ve Transfer Matris Metodu ile yapılan hesaplamalarla ve PC1D simülasyonu ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlarıyla hesaplama ve simülasyonların birbiriyle uyum içinde olduğu, dönel kaplama hızının artması ile ince film kalınlığının azaldığı ve dolayısıyla kontrol edilebildiği görüldü. Yalın silisyum yüzeyindeki ortalama yansımaya %36 olarak ölçülmesine karşın, HfO<sub>2</sub> ince filmin 3500rpm’de kaplanması ile elde edilen 71.36 nm’lik kalınlıkta %10.87 ortalama yansımaya elde edildi.



Şekil 37. Dönel kaplama hızına bağlı olarak ölçülen ve hesaplanan yansımaların yalnız silisyum yüzeyi ile karşılaştırılması

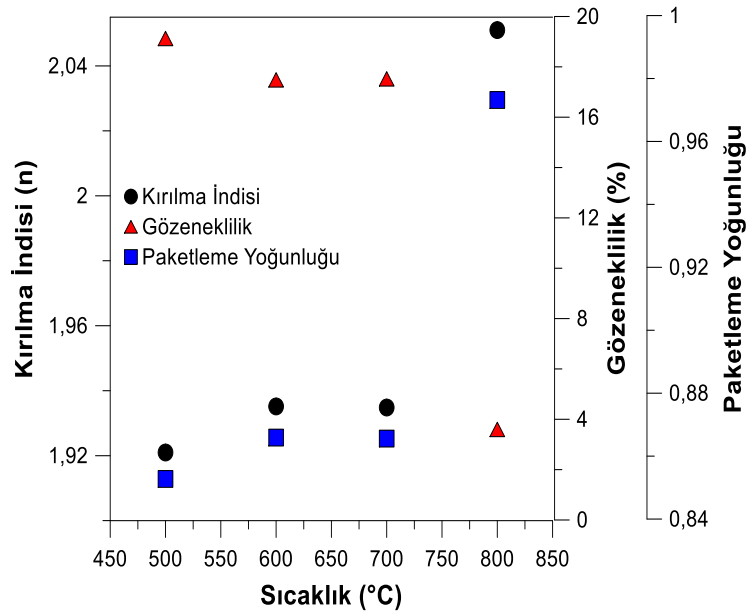
Ayrıca ince filmlerin kırınım indisleri ve kalınlıkları spektroskopik elipsometre ile belirlendi. İnce filmlerin kırınım indisinin (n) tavlama sıcaklığının artması ile arttığı belirlendi, 700°C’de tavlanan ince filmlerin indisi 1.934 iken 800°C tavlanan filmlerin indisi 2.05 olarak ölçüldü. Kaplama hızlarına bağlı elde edilen kalınlıklara ait enerji banr aralıkları 2000rpm için 5.19eV, 3000rpm için 5.0eV ve 4000rpm için ise 5.57eV olarak elde edildi. Tavlama sıcaklıklarının etkisini incelemek için ölçülen indis değerleri kullanılarak 3.1 ve 3.2 eşitlikleri ile gözeneklilik (P) ve paketleme yoğunluğu (PD) hesaplamaları yapıldı [99, 100].

Hesaplanan P ve PD değerleri ve kırınım indis değerleri Şekil 38’de verilmektedir.

$$P = 1 - \frac{n_f^2 - 1}{n^2 - 1} \quad (3.1)$$

$$PD = \left( \frac{n_f^2 - 1}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{n + 1}{n_f + 1} \right) \quad (3.2)$$

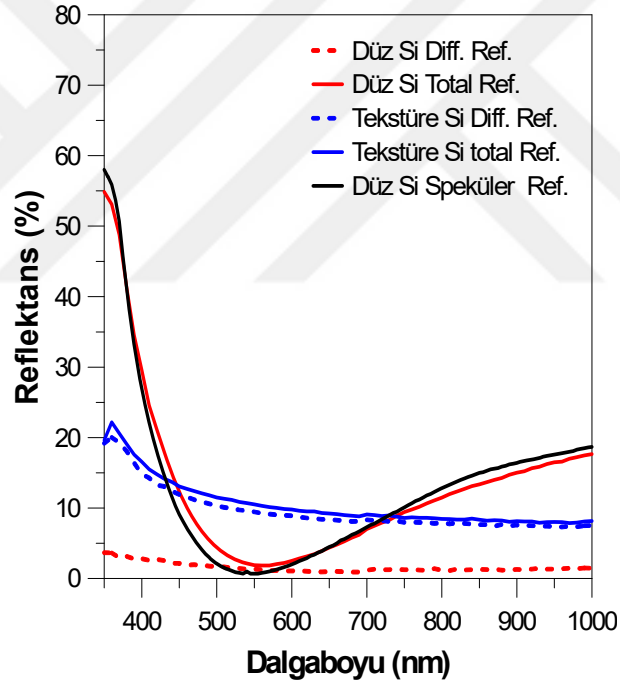
Burada ‘n’ bulk HfO<sub>2</sub>’nin kırınım indisi ve 600 nm’de 2.08 değerini almaktadır [101]. ‘n<sub>f</sub>’ ise oluşturulan ince filmlerin 600 nm’deki kırınım indis değerini göstermektedir. Literatürde de görüleceği üzere P ile PD ters orantılı ve P’nin azalması ile kırınım indisi artış göstermektedir [99, 100].



Şekil 38. Kırınım indisinin, gözeneklilik ve paketleme yoğunluğu üzerinde tavlama sıcaklığının etkisi

Şekil 38’de de görüldüğü üzere tavlama sıcaklığının artması ile daha kompakt filmlerin oluştuğu söylenebilir ve paketlenme yoğunluğu ile kırılma indisinin arttığı görülmektedir. Tavlama sıcaklığı 500°C’den 700°C’ye çıkarıldığında P değerinin %19.12’den %17.52’ye düştüğü görülmektedir. Tavlama sıcaklığı 800°C olduğunda ise P değeri %3.59’a kadar düştü. Bu nedenle 800°C’de tavlanan örneklerde kırınım indisinin çok yükselmesi oluşan filmlerin çok yoğun oluşu ve gözenekliliğin azalması ile açıklanabilir.

Bu sonuçlar yüksek sıcaklıklarda tavlamanın, gözenekliliği az, yoğunluğu fazla filmlerin oluşmasını sağladığını göstermektedir. 500°C ile 700°C arasında tavlanan örneklerde yansıma değerlerinin birbirine yakın olması, kırınım indislerinin yaklaşık değerli olmasından kaynaklanmaktadır. 800°C ve daha yüksek sıcaklıklarda ise kırınım indisleri optimum değerden uzaklaştığı için yansıma oranı da artış göstermektedir.



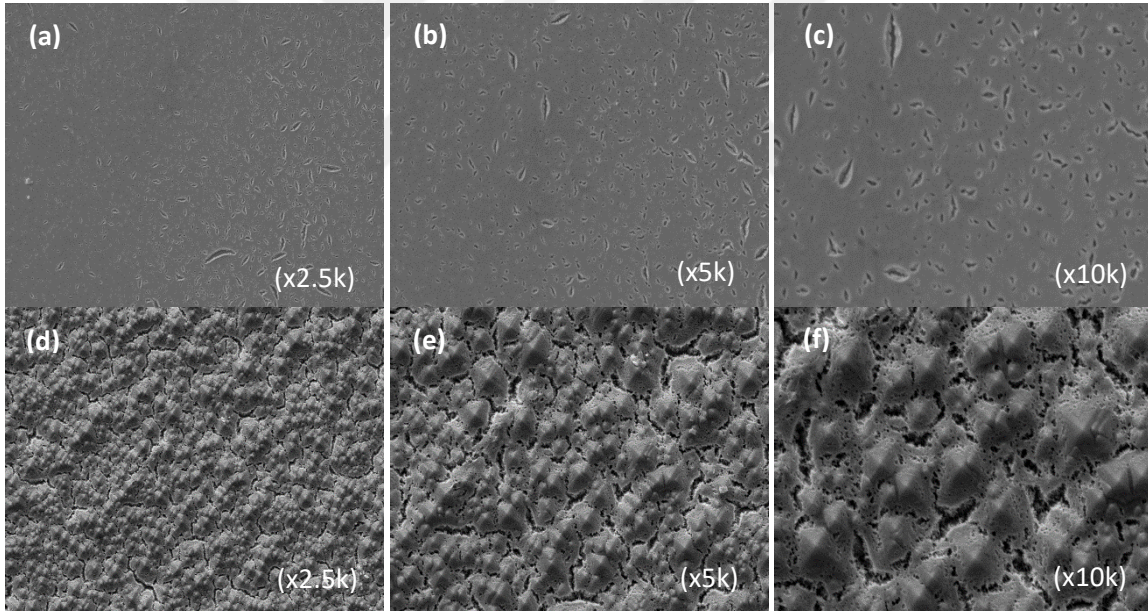
Şekil 39. 0.4M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma grafikleri

Optimum 0.4M HfO<sub>2</sub> ince filmlerin tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanarak total, difüz ve speküler yansıma ölçümleri tekrarlandı. Bu ölçümler Şekil 39’da ölçümlere ait değerler ise Tablo 9’da özetlenmektedir.

Tablo 9. 0.4M için tekstüre c-Si ve düz c-Si yüzeyine kaplanan HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma değerleri

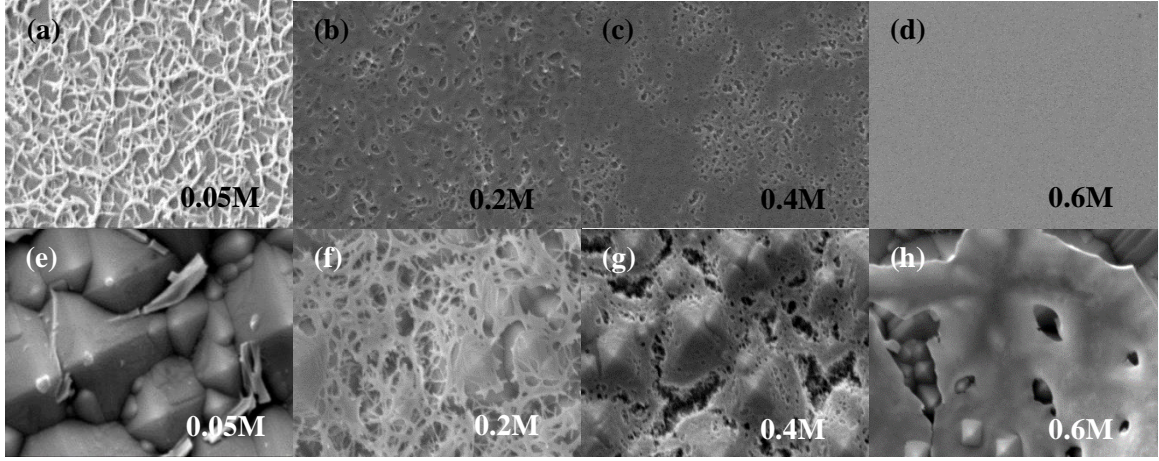
	Ort. Ref. (350-1000 nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
Düz c-Si Diff.	1.54	0.90	680
Düz c-Si Total	12.93	1.83	560
Tekstüre c-Si Diff.	9.63	7.31	960
Tekstüre c-Si Total	10.51	7.85	970
Düz c-Si Speküler	12.73	0.70	545

Şekil 40'ta HfO<sub>2</sub> solüsyonunun parlak düz ve tekstüre silisyum alttaş yüzeylerine kaplanmış ve optimum şartlarda tavllanmış SEM görüntüleri verilmektedir. Her iki yüzeyde de çatlaklar gözlenmiş ve bu durumun literatürde de belirttiği gibi hava ortamında tavlamanın etkisiyle meydana geldiği düşünülmektedir [102].



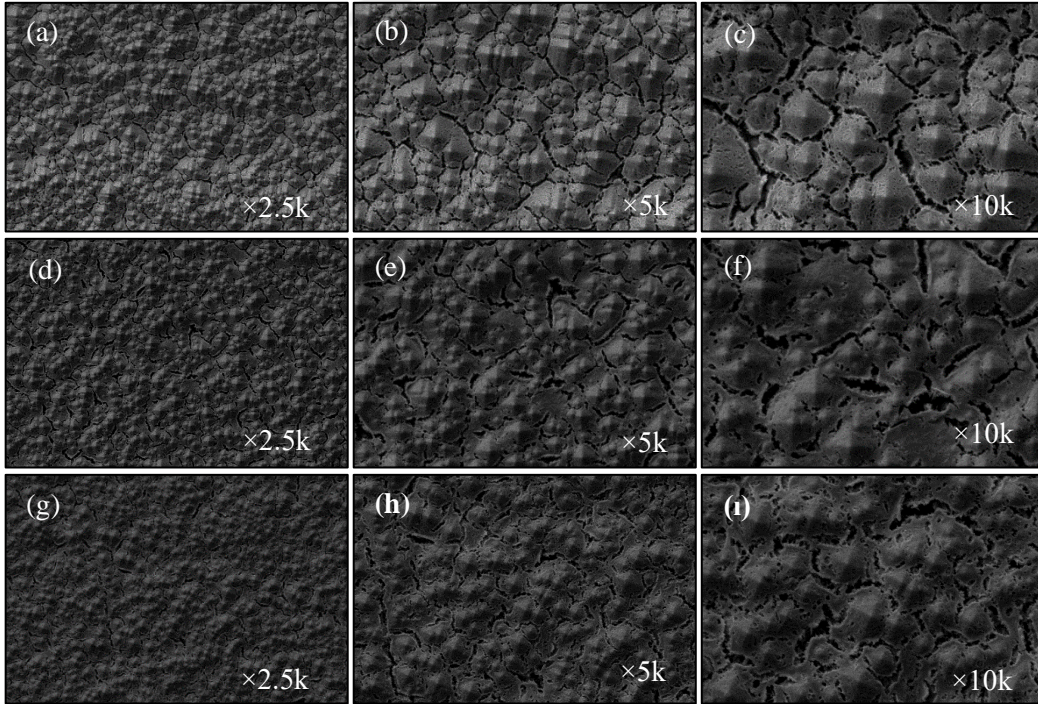
Şekil 40. Parlak yüzeyli silisyum alttaş üzerine (a-c) ve tekstüre edilmiş silisyum alttaş üzerine (d-f) kaplanmış HfO<sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüsü

Güneş hücrelerinde yüzeyin tekstüre edilmesi yansımayı etkileyen faktörlerden biri olduğu düşünüldüğünde bu tür çatlaklıkların giderilmesinin kaliteyi artıracığı düşünülmektedir. Bu amaç ile kullanılan solüsyonda değişiklik yapılmadan dönele kaplama süreci değiştirilerek SEM ölçümleri alındı. Ayrıca Şekil 41'de 0.05M'den 0.6M'ye kadar farklı molariteler de hazırlanmış solüsyonlarla kaplanmış ince filmlerin hem düz hem de tekstüre Si yüzeyindeki SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 41. Farklı molaritelerde hazırlanmış ince filmlerin SEM görüntüleri (x20k)

0.05M'de düz c-Si yüzeyinde lifli yapıların olduğu ve artan molariteyle birlikte yüzeyin tamamen homojen bir şekilde kaplandığı görülmektedir. Ancak tekstüre c-Si yüzeyinde 0.05 molaritelerde tam kaplamanın gerçekleşmediği, solüsyonun tepecikler arasında biriktiği görülmüştür. Artan molarite ile yüzeyin kısmen kaplandığı ancak homojen bir film elde edilemediği görülmektedir.

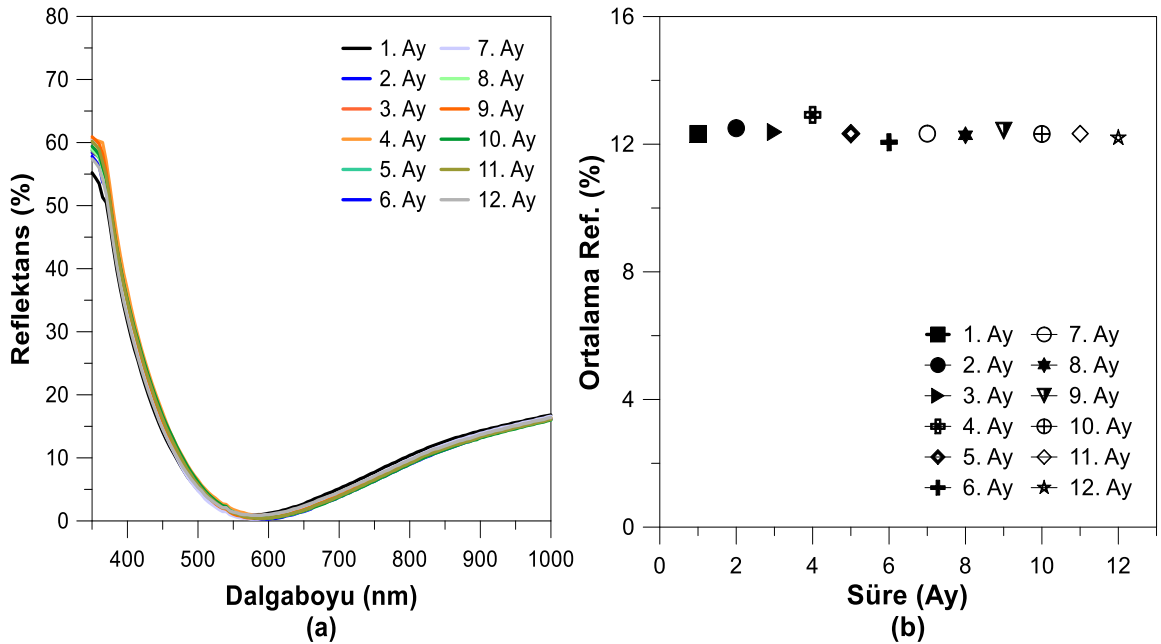


Şekil 42. Tekstüre yüzeyli silisyum alttaş üzerine farklı dönel kaplama işlemleri ile kaplanmış ve optimum şartlarda tavllanmış HfO<sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüsü

Tekstüre c-Si yüzeyindeki çatlakları gidermek için Şekil 42’de dönel kaplamannın 8000rpm’de yapılmış olduğu (a-c), 8000 rpm’de kaplandıktan sonra kurutularak tekrar kaplamannın yapıldığı (d-f), 8000 rpm’de her aşamada kurutulduktan sonra 3 kez kaplamannın yapıldığı (g-1) ve sonrasında optimum şartlarda tavlanan örneklerin SEM grafikleri verilmektedir. Çatlakların önlenmesi için yüksek hızlarda tekrarlı kaplamalar yapıldığı literatürde yer alsada çalışmamızda uygulanan 8000 rpm’de tekrarlı kaplamalar çatlakların giderilmesi için büyük bir etki göstermediği görüldü.

### 3.2.3. HfO<sub>2</sub> İnce Filmleri Üzerinde Yaşlanmanın Etkisi

İnce filmlerin yaşlanmasını etkileyen faktörleri anlamak ve malzemelerinin seçimine daha bütünsel bir yolla rehberlik etmek için ince film yaşlanma özelliklerini araştırmak önem arz etmektedir [103]. İnce filmlerin optik ve mekanik özellikleri üzerindeki yaşlanma etkileri, üretilen cihazların uzun süreli performansı ve kararlılığı için çok önemlidir. Bu nedenle yaşlanma etkilerinin bilinmesi gerekmektedir [104]. Bu bölümde HfO<sub>2</sub> ince filmleri üzerinde yaşlanmanın etkisini araştırmak için Optimum (0.4M, 700°C-120 dk) olarak hazırlanan HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yansıma ölçümleri haftalık olarak ölçüldü. Bir yıl boyunca tekrarlanan ölçümlerin aylık periyotlar şeklindeki yansıma grafikleri Şekil 43’te gösterilmektedir.

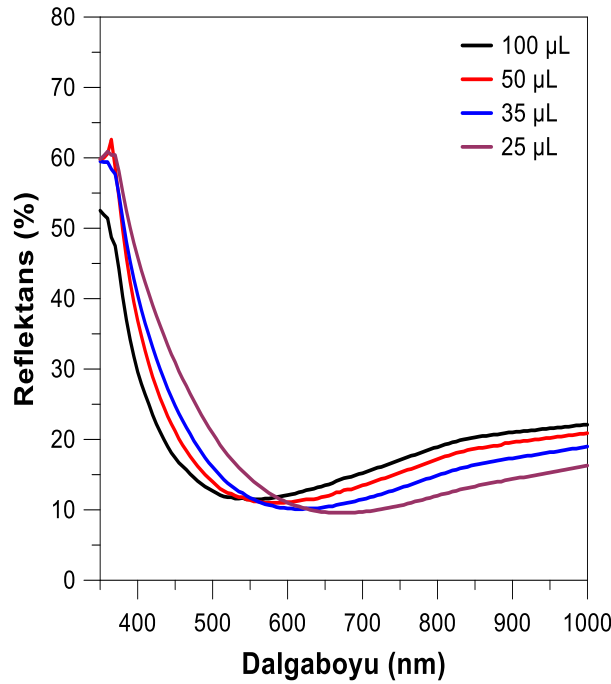


Şekil 43. 0.4M HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yaşlanmaya bağlı yansıma grafikleri

Yaşlanmaya bağlı ölçümlere bakıldığında HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin ortalama ve minimum yansıma değerlerinde ciddi bir sapma görülmemektedir. Küçük değişimlerin ölçüm esnasında deneysel hatalardan kaynaklandığı düşünülürse, HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin zamanla bozulmadığı ve stabilizesini koruduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin kararlı bir yapıda olduğu sonucuna varılabilir.

### 3.2.4. SiO<sub>2</sub> Tek Katmanlı Yansımayı Önleyici Katmanlar

Bu bölümde, daha sonra ele alınacak olan çift katmanlı YÖ kaplama ve SiO<sub>2</sub>-HfO<sub>2</sub> karışımı ince filmler elde edebilmek için öncelikle SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin kalınlık, tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi optimizasyonları gerçekleştirildi. Solüsyon hazırlık aşaması iki aşamada gerçekleşti. Birinci aşamada TEOS (C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>O<sub>4</sub>Si-%99), etil alkol ve su 3:2:4 hacim oranında oda sıcaklığında 30 dk karıştırıldıktan sonra 150 µl hidroklorik asit (HCl) eklenerek tekrar 10 dk boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak 24 saat yaşlandırmak üzere bekletildi. İkinci aşamada ise yaşlandırma işleminden sonra solüsyonu seyreltmek için 8ml etil alkol ilave edilerek kullanıldı. İlk olarak aynı yüzey alanı için 25 µl, 35 µl, 50 µl ve 100 µl olmak üzere farklı miktarlarda solüsyon kullanılarak solüsyon miktarına bağlı numuneler hazırlandı. Şekil 44'te solüsyon miktarına bağlı yansıma grafikleri verilmektedir.



Şekil 44. SiO<sub>2</sub> solüsyon miktarına bağlı yansıma grafikleri

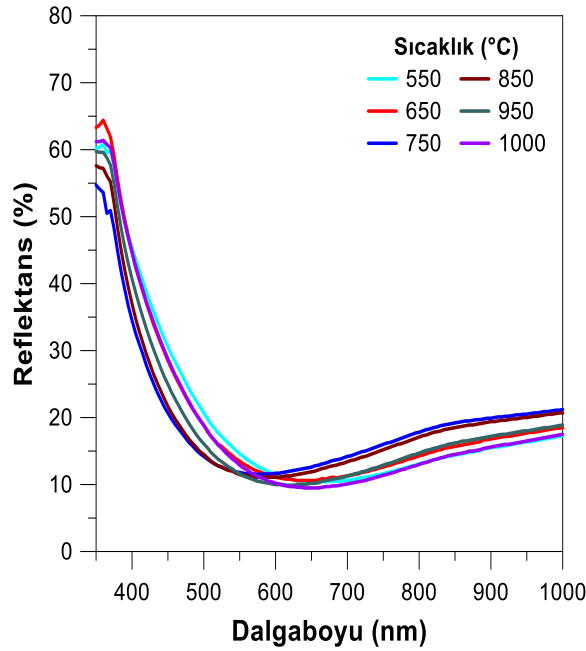


SiO<sub>2</sub> solüsyonu için miktara bağlı kalınlık değişiminin meydana geldiği ve minimum noktanın yüksek dalga boylarına kaydığı gözlemlendi. 350-1000 nm arasındaki ortalama yansımaya ve minimum yansımaya değerleri Tablo 10'da özetlenmektedir.

Tablo 10. SiO<sub>2</sub> solüsyonu miktarına bağlı minimum ve ortalama yansımaya değerleri

Sol. Miktarı (μl)	Ort. Ref. (350-1000 nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
100	19.26	11.50	555
50	19.62	11.00	583
35	19.02	10.10	615
25	19.20	9.60	678

Solüsyon miktarının artırılmasıyla minimum yansımaya değerinin %9.60'tan %11.50'ye kadar arttığı gözlemlendi. Aynı zamanda ortalama yansımaya değeri de %19.02'den %19.26'ya kadar artmıştır. Görünür ışık dalga boyu aralığındaki ortalama ve minimum noktalar dikkate alınarak deneylerde yüzeye damlatılan solüsyon miktarı 35 μl olarak belirlendi. Aynı şartlarda üretilen filmler sıcaklık optimizasyonu için 550°C ile 1000°C aralığında farklı sıcaklıklarda tavlandı. Dalga boyuna bağlı yansımaya grafikleri Şekil 45'te verilmektedir. Ayrıca minimum ve ortalama yansımaya değerleri Tablo 11'de özetlenmektedir.



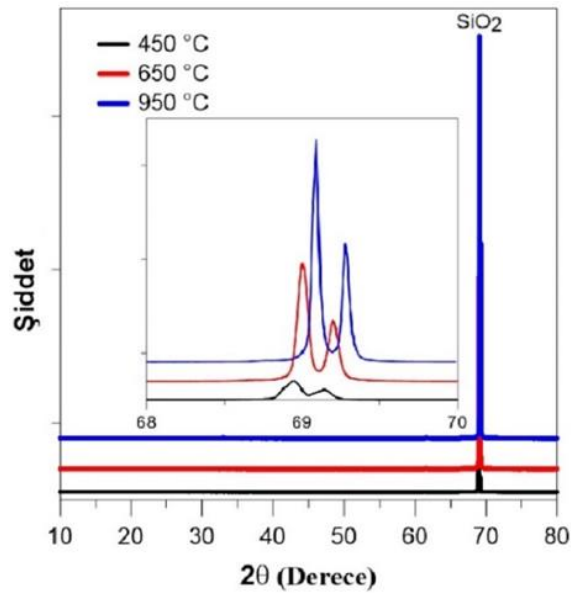
Şekil 45. SiO<sub>2</sub> ile kaplanmış silisyum yüzeyindeki yansımaya tavlama sıcaklığına bağlı değişimi

Tavlama sıcaklığı 550°C olduğunda minimum yansımaya %10.30 iken 750°C’de %11.50’ye kadar yükselerek daha yüksek sıcaklıklarda tekrar düşüşe geçti. Minimum yansımaya ve ortalama değerler dikkate alınarak optimize tavlama sıcaklığı 950°C olarak belirlendi.

Tablo 11. SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama sıcaklığına bağlı yansımaya değerleri

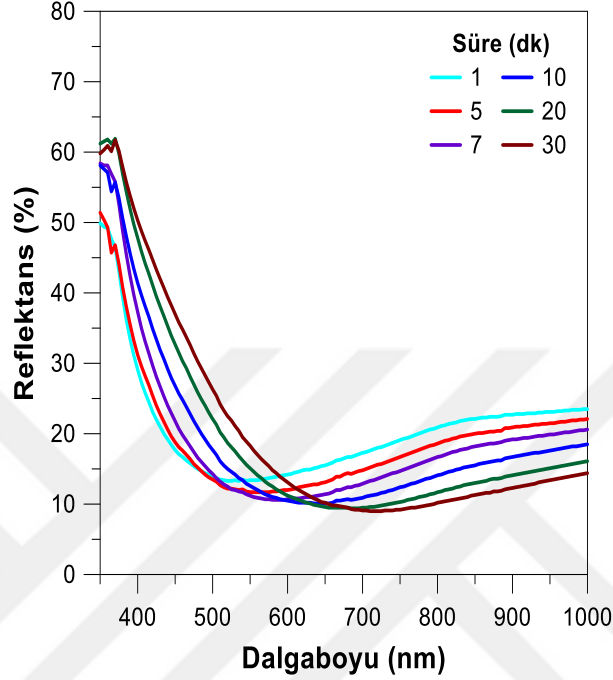
Sıcaklık (°C)	Ort. Ref. (350-1000 nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
550	19.73	10.30	658
650	19.98	10.60	643
750	19.47	11.50	578
850	19.48	11.10	588
950	18.93	9.90	620
1000	19.09	9.50	650

Sıcaklığa bağlı XRD desenleri Şekil 46’da verilmektedir. XRD ölçümlerinde  $2\theta=68.93^\circ$ ’de ortaya çıkan piklerin SiO<sub>2</sub> ince filmin etkisi olduğu görülmekte (COD card no: 96-400-2440) ve literatür [105] ile uyumludur. Sıcaklığın 950°C’ye çıkarılması ile piklerin daha kuvvetli hale geldiği ve dolayısıyla kristalleşmenin arttığı görülmektedir. Ölçümlerdeki sıcaklık arttıkça ve özellikle 950°C’de meydana gelen hafif kaymanın yüksek sıcaklıklarda malzemede oluşan stresin artmasına bağlı olduğu değerlendirilmektedir [106].



Şekil 46. SiO<sub>2</sub> ince filmlerine ait XRD deseni

Son olarak hazırlanan ayrı grup örnekler Şekil 47’de görüldüğü gibi 950°C’de farklı sürelerde tavlanaarak tavlama süresinin etkisi incelendi. Tavlama süresi 1 dk’dan 30 dk’ya kadar değiştirildi.



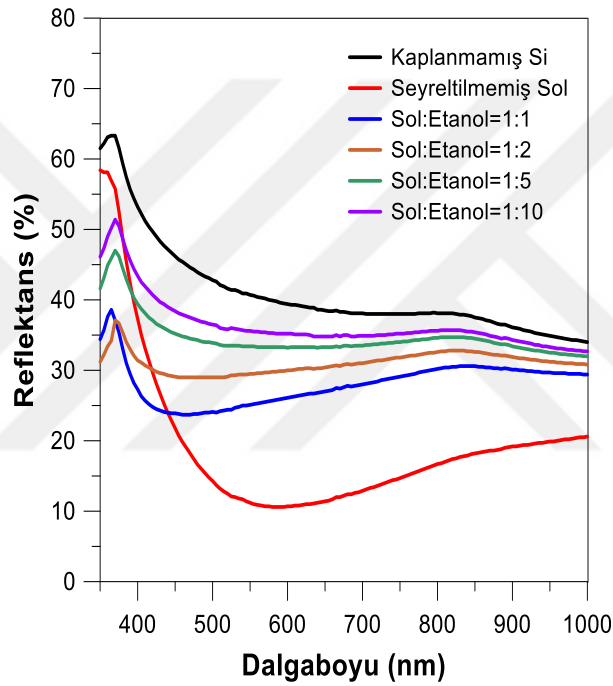
Şekil 47. SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama süresine bağlı yansıma grafikleri

Tablo 12’de görüldüğü gibi numunelerin 1 dk süreyle tavlanaması sonucunda ortalama ve minimum yansıma değerleri sırasıyla %20.61 ile %13.30 (535 nm) olarak kaydedildi. Tavlama süresinin 10 dk’ya çıkarılması ile bu değerler sırasıyla %18.99 ve %10.10 (645 nm) en düşük değerleri alındı.

Tablo 12. SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin tavlama süresine bağlı yansıma değerleri

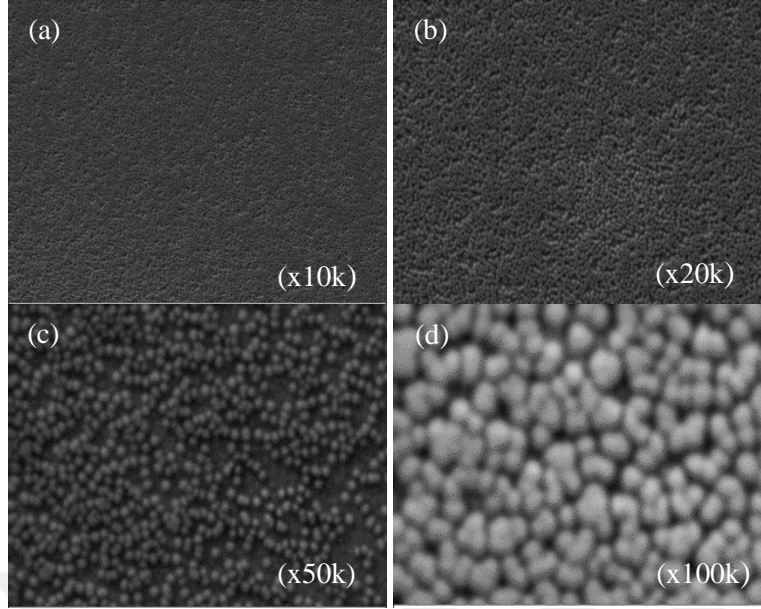
Süre (dk)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
1	20.61	13.30	535
5	19.34	11.70	565
7	19.26	10.60	590
10	18.99	10.10	645
20	19.54	9.40	690
30	20.06	9.00	720

Tavlama süresinin 7 dk olduğu durumda ortalama ve minimum yansıma değerleri sırasıyla %19.26 ve %10.60 (590 nm) olarak ölçüldü. 7 dk'lık tavlama süresinin ortalama ve minimum yansıma değerleri ile 10 dk'lık ortalama ve minimum yansıma değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle minimum yansıma değerinin görünür bölgenin ortalarına yakın olanı optimum olarak kabul edildi. Ek olarak SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının etanol ile daha fazla seyreltilmesinin etkisi de araştırıldı. Optimize solüsyon etanol ile hacimsel olarak Sol:etanol, 1:1, 1:2, 1:5, 1:10 oranlarında seyreltilerek ölçümler alındı. Dalga boyuna bağlı yansıma etkisi Şekil 48'de görülmektedir.



Şekil 48. Seyreltilmiş solüsyon uygulandığında elde edilen SiO<sub>2</sub> kaplı silisyum yüzeyi yansıma grafikleri

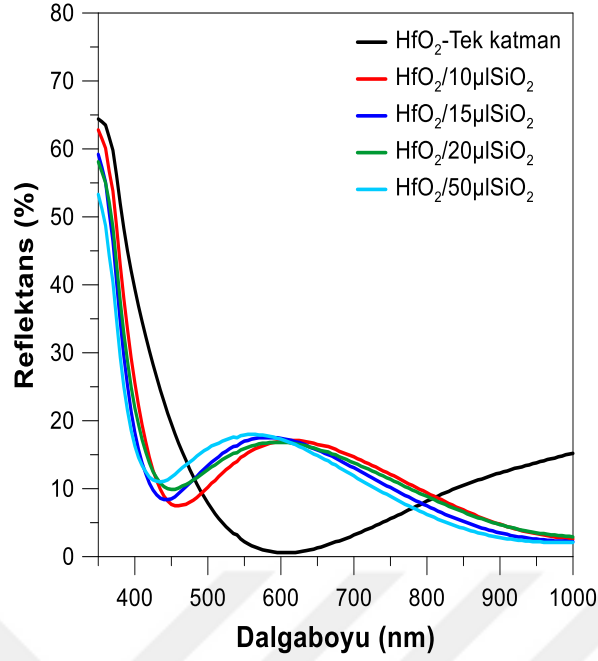
Yansımanın seyreltilmemiş solüsyona oranla arttığı ve minimum noktanın görünür ışık bölgesinden kaydığı gözlemlendi. Bu sonuçlara göre seyreltilmiş solüsyonun yansıma değerlerine pozitif etkisi görülmemektedir. Şekil 49'da optimum solüsyonla kaplı silisyum yüzeylerinin SEM görüntüleri verildi. SiO<sub>2</sub> ince filminin homojen bir şekilde kaplandığı ve yüzeydeki partiküllerin gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 49. SiO<sub>2</sub> ince filmlerin SEM ölçümleri

### 3.3. Çift Katmanlı HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Yansımaya Önleyici Kaplama

Bu bölümde farklı deneysel süreçlerle oluşturulmuş HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> tek katman ince filmleri ile her bir filmin optik özellikleri göz önüne alınarak HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonları c-Si yüzeyine kaplanarak HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si çift katman yansımaya önleyici yapıları oluşturularak optiksel ve yapısal özellikleri incelendi. Başlangıç olarak 3500 rpm kaplama hızında ve 700°C'de 120 dk tavllanmış optimum numuneler üzerine 4000 rpm kaplama hızında 950°C'de 7 dk tavllanmış SiO<sub>2</sub> ince filmleri ikinci katman olarak büyütüldü. İkinci katman olan SiO<sub>2</sub> ince filminin yüksek tavlama sıcaklığı ve film kalınlığının fazla olması minimum noktanın yüksek dalga boylarına kaymasına ve ortalama yansımının artmasına sebep oldu. Bu nedenle tavlama sıcaklığı 450°C'de 5 dk'ya düşürülerek deneyler tekrarlandı. Çift katman HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/p-Si YÖ kaplama adına ikinci katmanın kalınlığını ayarlamak için hazırlanan SiO<sub>2</sub> başlangıç solüsyonunu miktara bağlı kaplama ve solüsyonu seyreltme işlemleri uygulandı. İlk olarak optimum şartlarda HfO<sub>2</sub> kaplanmış numune üzerine 10 µl, 15 µl, 20 µl ve 50 µl olmak üzere farklı miktarlarda SiO<sub>2</sub> solüsyonu damlatılarak SiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub>/p-Si çift katman YÖ kaplama oluşturuldu. Elde edilen yapılara ait yansımada-dalgaboyu grafikleri Şekil 50'de; bu yapılara ait minimum ve ortalama yansımada değerleri ise Tablo 13'te özetlenmektedir.



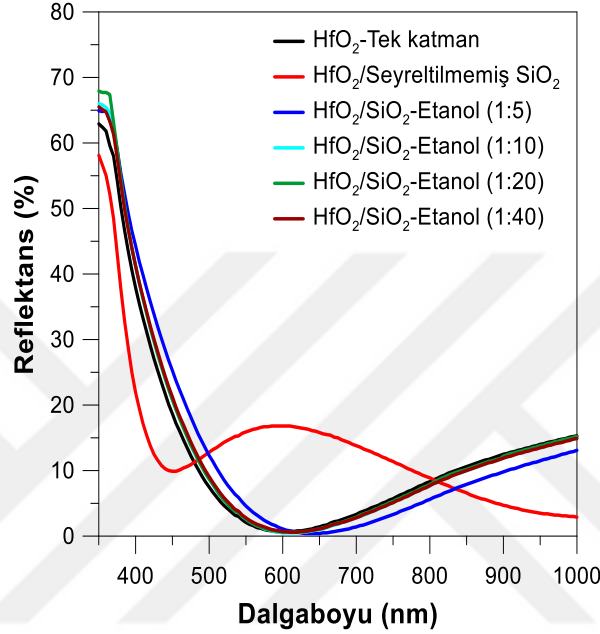
Şekil 50. Çift katman YÖ kaplama için SiO<sub>2</sub> solüsyon miktarına bağlı yansıma grafikleri

Tablo 13. Tek katman ve çift katman ortalama ve minimum yansıma değerleri

Tek Katman			
Numune	Ort.Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
HfO <sub>2</sub> /10µl SiO <sub>2</sub>	12.87	0.60	608
HfO <sub>2</sub> /15µl SiO <sub>2</sub>	12.79	0.70	600
HfO <sub>2</sub> /20µl SiO <sub>2</sub>	12.90	0.60	598
HfO <sub>2</sub> /50µl SiO <sub>2</sub>	12.45	0.50	590
Çift Katman			
	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
HfO <sub>2</sub> /10µl SiO <sub>2</sub>	13.67	2.60	1000
HfO <sub>2</sub> /15µl SiO <sub>2</sub>	12.59	2.20	998
HfO <sub>2</sub> /20µl SiO <sub>2</sub>	13.38	2.90	1000
HfO <sub>2</sub> /50µl SiO <sub>2</sub>	12.14	2.10	1000

Solüsyon miktarına bağlı yansıma değerlerinde iyileşme görülmediği, solüsyon miktarının artmasıyla birlikte yeterli derecede kalınlık incelmeye gerçekleşmediği için ortalama ve minimum yansıma değerlerinin arttığı gözlemlendi. Sadece HfO<sub>2</sub>/50µl SiO<sub>2</sub> yapısında ortalama yansıma değerinin %12.45'ten %12.14'e düştüğü görüldü. Ancak minimum yansıma değerinin %0.50'den %2.10'a yükseldiği ve minimum noktanın yüksek dalga boylarına kaydığı gözlemlendi. Ortalama ve minimum yansıma değerlerini düşürmek

için SiO<sub>2</sub> solüsyonuna hacimsel olarak SiO<sub>2</sub>:etanol=1:5, SiO<sub>2</sub>:etanol=1:10, SiO<sub>2</sub>:etanol=1:20 ve SiO<sub>2</sub>:etanol=1:40 oranında seyreltme işlemi uygulanarak önceden hazırlanmış olan optimum tek katman HfO<sub>2</sub> ince filmlerine ikinci katman olarak uygulandı. Bu örneklere ait yansımaya grafikleri Şekil 51’de, ortalama ve minimum yansımaya değerleri de Tablo 14’te özetlenmektedir.



Şekil 51. SiO<sub>2</sub> Solüsyonunun seyreltmeye bağlı çift katman yansımaya grafikleri

Tablo 14. Tek katman ve çift katman ortalama ve minimum yansımaya değerleri

Numune	Tek Katman		
	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
HfO <sub>2</sub> /Seyreltilmemiş SiO <sub>2</sub>	12.45	0.50	590
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:5)	12.67	0.60	603
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:10)	12.63	0.50	588
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:20)	12.81	0.60	603
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:40)	12.80	0.60	598
Çift Katman			
	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
HfO <sub>2</sub> /Seyreltilmemiş SiO <sub>2</sub>	12.14	2.10	1000
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:5)	13.06	0.40	640
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:10)	13.06	0.50	608
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:20)	13.28	0.60	610
HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> -Etanol (1:40)	13.12	0.60	618

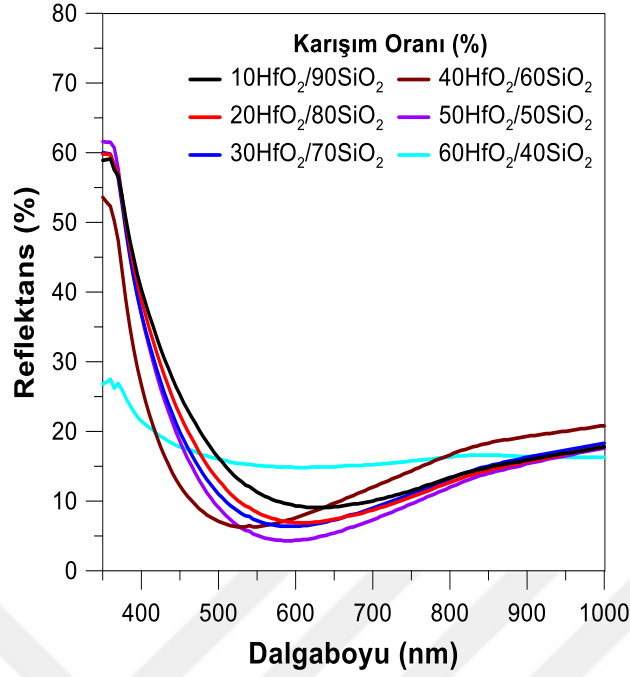
SiO<sub>2</sub> solüsyonundaki etanol oranının değiştirilmesi ile belirgin iyileşmenin sağlanamadığı ve HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-Çift katman örneklerinde SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin kalınlığının etil alkolle seyreltilerek düşürülmesiyle yüksek dalga boyuna kaymanın ve ortalama yansımadaki artışın azaldığı görüldü.

Çift katmanlı ince film yapılarında indis sıralamasına göre ince filmler oluşturulduğunda ortalama yansımının düşmesi beklenmektedir. Bu çalışmamızda da oluşturulan HfO<sub>2</sub> ince filmlerin indislerinin yaklaşık 1.93 (600 nm) olduğu düşünüldüğünde indis değeri daha düşük olan SiO<sub>2</sub> ince filmleri ile oluşturulmuş çift katman yapısında yansımaya değerlerinin geniş dalga boyu aralığında düşürülmesi beklenebilir. Fakat ortalama yansımının tek katmanla kıyaslandığında önemli ölçüde düşürülememesinin nedeni SiO<sub>2</sub> ince film kalınlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışmamızda ikili katmanlardaki HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin kalınlığı optimum değer olduğunu gösterdiğimiz yaklaşık 70nm iken en iyi sonucun elde edildiği çift katmanlı yapıda SiO<sub>2</sub> kalınlığının simülasyon sonucu yaklaşık 30 nm olduğu tahmin edilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre SiO<sub>2</sub> katmanının 5 nm gibi değerlere düşürülmesinin daha iyi sonuçlar verebileceği görülse de deneysel koşullarımız ve ekipmanlarımızla bu kalınlık elde edilemedi.

#### **3.4. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Karışımları ile Oluşturulan Yansımaya Önleyici Kaplamalar**

Önceki bölümlerde HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin c-Si güneş hücreleri üzerinde YÖ kaplama etkisini araştırmak için her bir film için farklı optimizasyonlar yapılarak optimum yansımaya değerleri elde edilmişti. Bu bölümde ise HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> filmleri için hazırlanan optimum solüsyonlarının farklı oranlarda karışımı sonucunda oluşan yeni bir solüsyonla c-Si güneş hücreleri için ortalama ve minimum yansımaya değerleri ölçüldü. İlk olarak HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonları sırasıyla %10-%90, %20-%80, %30-%70, %40-%60, %50-%50, %60-%40, %70-%30, %80-%20 ve %90-%10 oranlarında 9 farklı solüsyon ile c-Si yüzeyine kaplandı. Hazırlanan solüsyonlar 3500 rpm kaplama hızında 700°C'de 30 dk tavlama sıcaklığı ile numuneler hazırlanarak yansımaya ölçümleri alındı. Bu numunelere ait yansımada dalga boyu grafikleri Şekil 52'de gösterilmektedir. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışım solüsyonundaki HfO<sub>2</sub> miktarının artması ile ince filmlerin yansımaya değerlerinde iyileşme olduğu görüldü. Tablo 15'te görüldüğü gibi %10HfO<sub>2</sub>-%90SiO<sub>2</sub> oranında hazırlanan solüsyonla elde edilen ince filmlerde ortalama ve minimum yansımaya değerleri sırasıyla %18.11 ve %9.10 olarak elde edildi.





Şekil 52. HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının farklı oranlarda karıştırılması ile oluşan yansıtma grafikleri

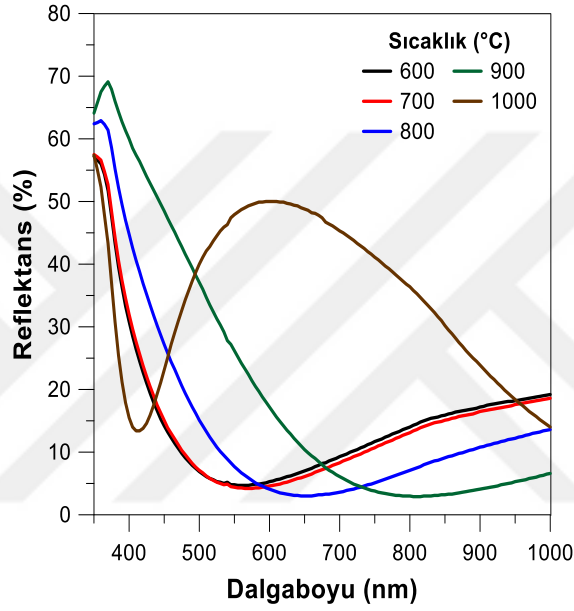
Solüsyondaki HfO<sub>2</sub> oranının artması ile %50HfO<sub>2</sub>-%50SiO<sub>2</sub> oranında üretilen ince filmlerin ortalama ve minimum yansıtma değerleri sırasıyla %15.14 ve %4.30 olarak en düşük değerleri elde edildi. Ancak, HfO<sub>2</sub>:SiO<sub>2</sub> çözeltisinin oranı HfO<sub>2</sub> içeriğinin SiO<sub>2</sub>'den daha yüksek olduğu %60HfO<sub>2</sub>-%40SiO<sub>2</sub> (hacim olarak) olduğunda minimum yansıtma değeri daha yüksek değerlere kaydığı gözlemlendi.

Tablo 15. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının farklı oranlarda karıştırılması ile oluşan yansıtma değerleri

Karışım Oranı (%)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
10HfO <sub>2</sub> -90SiO <sub>2</sub>	18.11	9.10	630
20HfO <sub>2</sub> -80SiO <sub>2</sub>	16.74	6.90	610
30HfO <sub>2</sub> -70SiO <sub>2</sub>	16.37	6.40	593
40HfO <sub>2</sub> -60SiO <sub>2</sub>	16.13	6.30	538
50HfO <sub>2</sub> -50SiO <sub>2</sub>	15.14	4.30	590
60HfO <sub>2</sub> -40SiO <sub>2</sub>	16.88	14.80	608

%60HfO<sub>2</sub>-%40SiO<sub>2</sub> solüsyonu ile elde edilen ince filmlerin yansıtma değerleri bir önceki orana göre arttığı için ve daha sonraki oranlarda (%70HfO<sub>2</sub>-%30SiO<sub>2</sub>, %80HfO<sub>2</sub>-

%20SiO<sub>2</sub>, %90HfO<sub>2</sub>-%10SiO<sub>2</sub>) homojen bir film elde edilmediği için optimum solüsyon oranı %50HfO<sub>2</sub>-%50SiO<sub>2</sub> olarak belirlendi ve deneylere bu oran ile devam edildi. %50HfO<sub>2</sub>-%50SiO<sub>2</sub> solüsyonu ile hazırlanan ince filmlerin üzerinde tavlama sıcaklığının etkisini araştırmak için örnekler 600°C'den 1000°C'ye kadar 30 dk süreyle oda koşullarında tavlandı. Örneklerin tavlama sıcaklığına bağlı yansıma grafikleri Şekil 53'te gösterilmektedir. Ayrıca gösterim kolaylığı için çalışmanın devamında %50HfO<sub>2</sub>-%50SiO<sub>2</sub> gösterimi HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) olarak ifade edilmektedir.



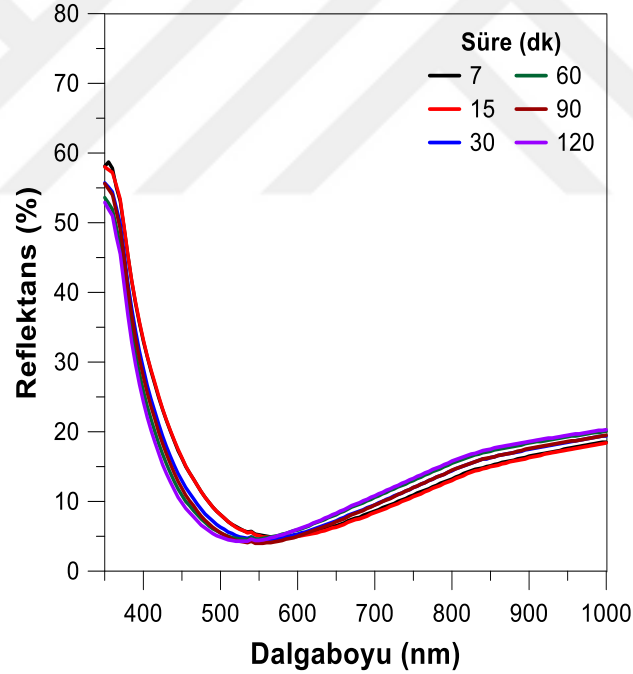
Şekil 53. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı yansıma grafikleri

Tablo 16' dan görüldüğü gibi 600°C ve 700°C'de tavllanmış örneklerin ortalama yansıma değerleri sırasıyla %15.09 ve %14.72 ile hemen hemen aynı profili göstermektedir. Güneş spektrumunun pikleri ile iyi örtüşen 600°C ve 700°C tavlama sıcaklıkları için sırasıyla 563 nm ve 570 nm'de minimum yansıma gözlemlendi. 800°C'de tavllanmış örneklerin ortalama yansıma değeri %14,71 iken, 600°C ve 700°C'de tavllanmış örneklerin ortalama yansıma değerine yakın bir değer olmasına rağmen, minimum yansıma noktası daha uzun dalga boylarına doğru kaydığı gözlemlendi. Örnekler, 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tavlandığında ortalama yansıma değeri önemli ölçüde arttı ve minimum yansıma noktasının daha uzun dalga boylarına kaydığı gözlemlendi. Bu sonuçlardan yola çıkarak en iyi yansıma değerlerinin elde edildiği sıcaklık değeri 700°C olarak belirlendi.

Tablo 16. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı yansımaya değerleri

Sıcaklık (°C)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
600	15.09	4.70	563
700	14.72	4.20	570
800	14.71	3.00	653
900	20.87	2.90	810
1000	35.02	13.40	413

Optimum tavlama sıcaklığının belirlenmesinden sonra optimum tavlama süresini belirlemek için HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonu ile hazırlanan ince filmler 700°C'de hava ortamında 7 dk ile 120 dk arasında farklı sıcaklıklarda tavlandı. Tavlama süresine bağlı yansımaya grafikleri Şekil 54'te, yansımaya değerleri ise Tablo 17'de gösterilmektedir.



Şekil 54. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ince filmlerin tavlama süresine bağlı yansımaya grafikleri

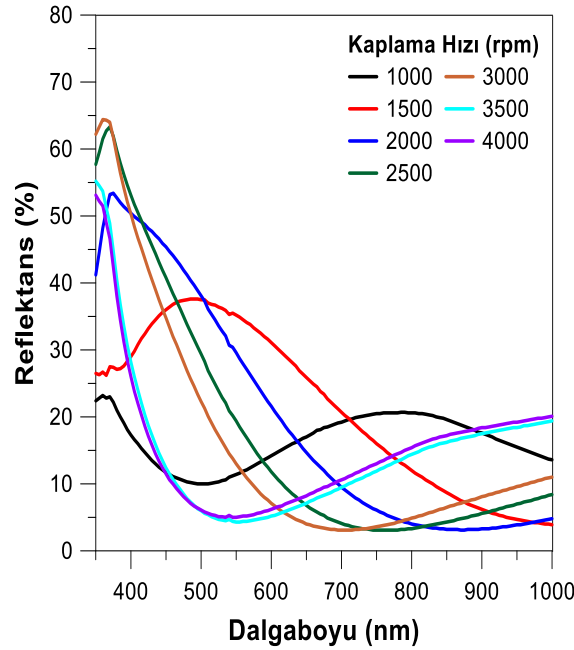
Hazırlanan numunelerin 700°C'de 7 dk hava ortamında tavllanmasıyla ortalama ve minimum yansımaya değerleri sırasıyla %15.18 ve %4.90 iken tavlama süresinin 90 dk'ya çıkarılmasıyla ortalama ve minimum yansımaya değerleri sırasıyla %14.58 ve %4.00 en düşük

değerleri elde edildi. 120 dk'lık tavlama süresinde ise yansımaya değerleri tekrar yükselerek sırasıyla %14.75 ve %4.30 değerlerini aldığı görüldü.

Tablo 17. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı ince filmlerin tavlama süresine bağlı yansımaya değerleri

Süre (dk)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
7	15.18	4.90	573
15	15.05	4.80	578
30	14.90	4.50	553
60	14.92	4.50	535
90	14.58	4.00	550
120	14.75	4.30	528

Son olarak HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filmlerinin kalınlığını ayarlamak için ince filmler 1000-4000 rpm aralığında 500 rpm'lik adımlarla kaplanarak daha önceki deney aşamalarında belirlenen 700°C'de 90 dk boyunca hava ortamında tavlandı. Kaplama hızına bağlı yansımaya grafikleri Şekil 55'te gösterilmektedir. Ayrıca ortalama ve minimum yansımaya değerleri Tablo 18'de özetlenmektedir.



Şekil 55. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı ince filmlerin kaplama hızına bağlı yansımaya grafikleri

Kaplama hızı arttıkça minimum yansımaya noktası daha kısa dalga boylarına doğru kaydığı görüldü, bu da filmin daha ince hale geldiğini gösterir. 1500 rpm ve 3500 rpm kullanılarak kaplanan filmlerin kalınlıkları sırasıyla 887 nm ve 173 nm olarak ölçüldü. Kaplama hızı 1000 rpm iken ortalama yansımaya değeri %16,44 olmasına rağmen görünür aralıktaki minimum yansımaya değeri yüksek olmuştur. 1500 rpm'den 3500 rpm'ye kadar olan kaplama hızı aralığı için ortalama yansımaya değerinin neredeyse doğrusal olarak azaldığı görüldü. Kaplama hızı 3500 rpm iken en düşük ortalama yansımaya değeri %14.68 olarak kaydedildi ve değerle birlikte 550 nm civarında minimum yansımaya noktası değeri elde edildi. Bu sonuçlar, özellikle kaplanmamış silisyum yüzeyinin ortalama yansımaya değerinin %35 civarında olduğu düşünüldüğünde, nispeten iyidir.

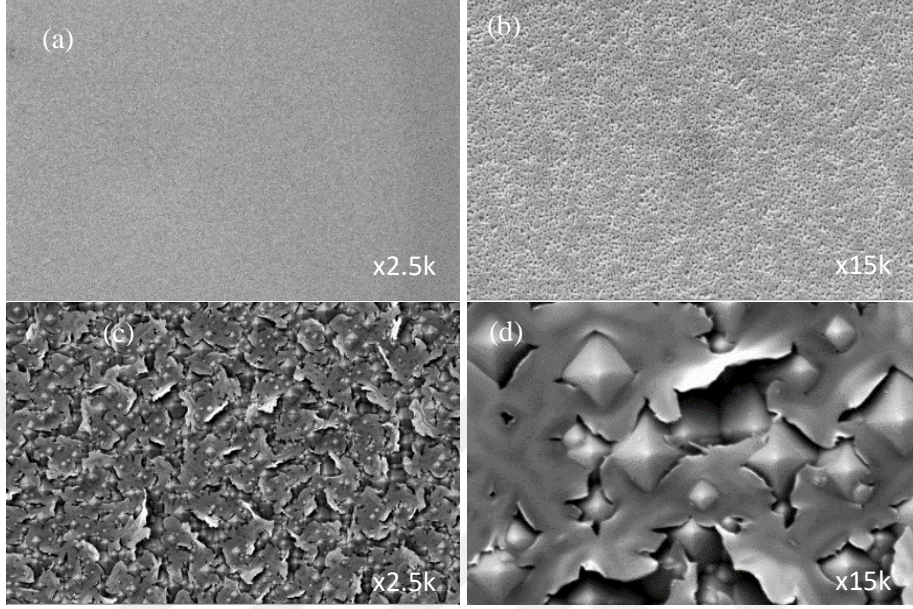
Tablo 18. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı ince filmlerin kaplama hızına bağlı yansımaya değerleri

Kaplama Hızı (rpm)	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref. (%)	Min. Ref. noktası (nm)
1000	16.44	10.00	503
1500	21.36	3.90	1000
2000	19.75	3.10	873
2500	17.37	3.10	763
3000	15.96	3.10	705
3500	14.68	4.30	553
4000	15.05	5.00	550

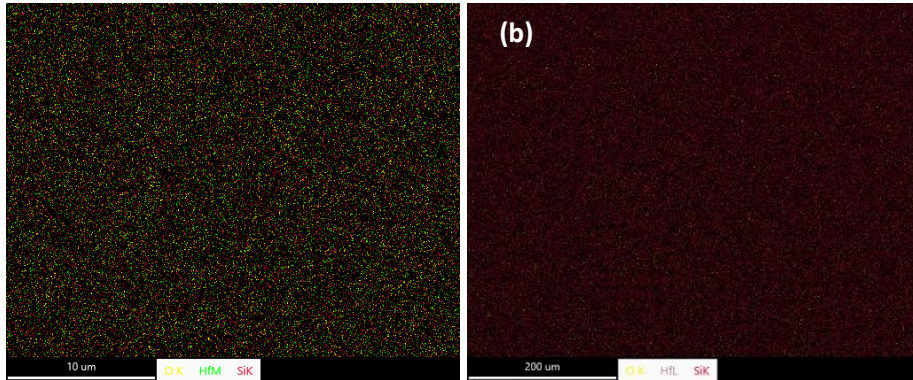
Şekil 56'da verilen SEM görüntüleri, parlak (Şekil 56(a-b)) ve tekstüre (Şekil 56(c-d)) silisyum yüzeyinin, 1:1 oranında HfO<sub>2</sub>:SiO<sub>2</sub> karışık çözelti ile kaplanmış ve 90 dk boyunca 700°C'de tavlandıktan sonraki yüzey morfolojisini göstermektedir. İnce filmler düz silisyum yüzeyine kaplandığında nano gözenekli yapılarla homojen bir kaplama ve pürüzsüz yüzey morfolojisinin oluştuğu görülmektedir. Ancak, ince filmler tekstüre silisyum yüzeyine kaplandığında filmlerin yüzeyden kopması gözlemlendi; bu durumun çözeltinin piramitler arasında birikmesinden ve tavlama sırasında yüksek sıcaklıklarda ilave gerilimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

İnce filmlere ait element analizini gerçekleştirmek için EDAX ölçümleri alındı. Düz silisyuma kaplanmış filmlere ait EDAX görüntüleri Şekil 57(a)'da; tekstüre silisyuma kaplanmış filmlere ait EDAX görüntüleri ise Şekil 57(b)'de verilmektedir. Ayrıca Tablo 19'dan görüldüğü gibi düz silisyum için Hf, Si ve O içerikleri sırasıyla %40.13, %30.06 ve

29.81 tekstüre silisyum için ise %16.82, %75.10, %8.08 olduğu görüldü. Tekstüre Si, yüzeydeki Si'nin büyük oranda artışı ile Hf ve O düşüşü, tekstüre yüzeyin kısmen yırtılmış bölgelerle iyi bir kaplama olmamasına bağlanabilir.



Şekil 56. HfO<sub>2</sub>: SiO<sub>2</sub>(1:1) çözeltisi ile kaplanmış düz (a-b) ve tekstüre (c-d)silisyum yüzeyin SEM görüntüleri



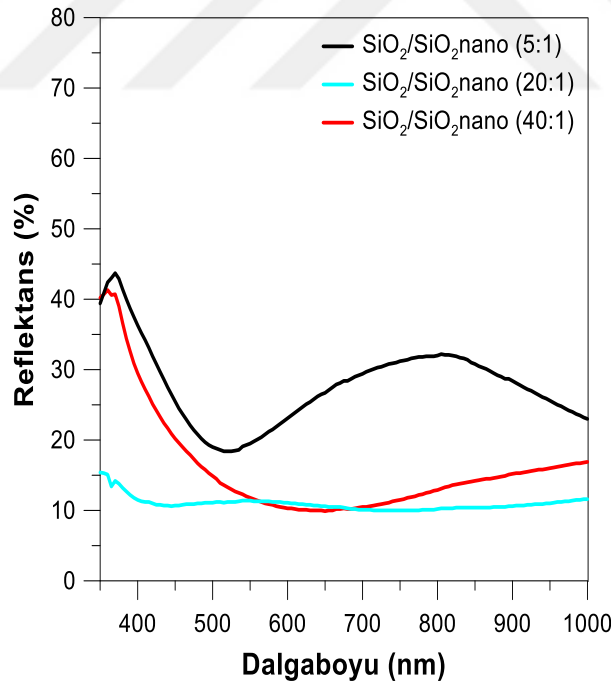
Şekil 57. Hf, O ve Si dağılımını gösteren EDAX görüntüleri

Tablo 19. Düz ve tekstüre silisyum yüzeyindeki filmlerin ağırlıkça yüzdelik oranı

	Hf	Si	O
Düz Si	40.13	30.06	29.81
Tekstüre Si	16.82	75.10	8.08

### 3.5. SiO<sub>2</sub> Nanopartikül Katkısının HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) Solüsyonları Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde SiO<sub>2</sub> Nanopartikül(Nprt) katkıli HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışım solüsyonu ile tek katmanlı HfO<sub>2</sub>/p-Si, SiO<sub>2</sub>/p-Si ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si yapıları oluşturularak yansıma önleyici etkisi araştırıldı. Yapılan deneylerde HfO<sub>2</sub> solüsyonuna SiO<sub>2</sub>Nprt katkısının yapılması sonucunda homojen bir film elde edilemedi. Ancak SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> solüsyonlarına yapılan SiO<sub>2</sub>Nprt katkısı ile homojen bir film elde edildi ve farklı oranlarda SiO<sub>2</sub>Nprt katkısı ile deneyler gerçekleştirildi. Deneylere SiO<sub>2</sub> solüsyonuna farklı oranlarda SiO<sub>2</sub>Nprt solüsyonu eklenerek başlandı. SiO<sub>2</sub> solüsyonuna SiO<sub>2</sub>Nprt katkısı yapıldıktan sonra altlık sıcaklığı 50°C olacak şekilde manyetik karıştırıcı ile 10 dk boyunca karıştırılarak kaplama işlemine hazır hale getirildi. Kaplama işlemi, döndürerek kaplama işlemi kullanılarak gerçekleştirildi. SiO<sub>2</sub>Nprt katkıli SiO<sub>2</sub> ince filmler p tipi Si altlığı üzerine 4000 rpm'de 30 saniye süreyle kaplandı. Tavlama sıcaklığı 950°C ve tavlama süresi 7 dk olarak uygulandı [107].



Şekil 58. SiO<sub>2</sub>Nprt katkıli SiO<sub>2</sub> ince filmlerin katkılama oranına bağlı reflektans grafiği

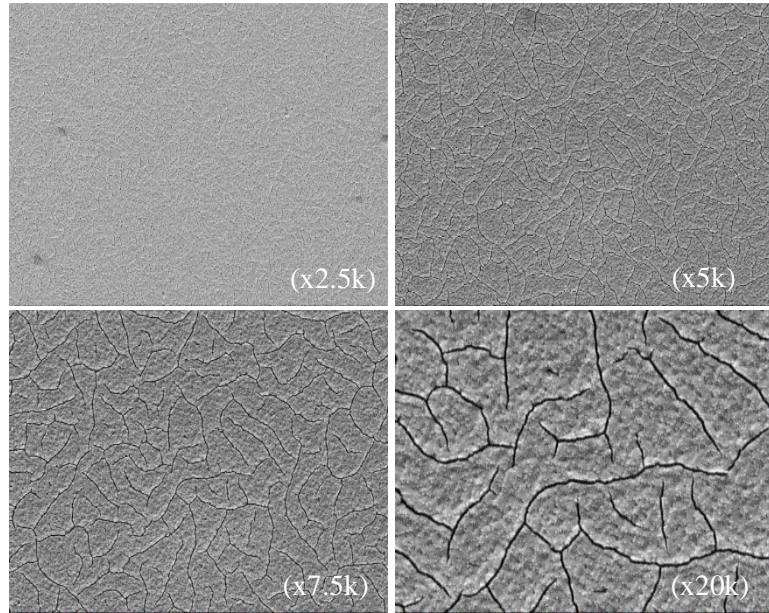
Katkılama işlemi sırasıyla SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Nprt(40:1), SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Nprt(20:1), SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Nprt(5:1), SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Nprt(2:1), SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>Nprt(1:1) olmak üzere 5 farklı oranda

gerçekleştirildi. Ancak bazı oranlarda homojen film elde edilemedi. Homojen filmlerin elde edildiği farklı oranlardaki  $\text{SiO}_2\text{Nprt}$  katkılı  $\text{SiO}_2$  ince filmlere ait reflektans-dalgaboyu grafiği Şekil 58’de, ölçümlere ait değerler ise Tablo 20’de gösterilmektedir. Tablo 20’den görüldüğü gibi en düşük ortalama reflektans değeri %10.95 ortalama ile  $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$  (20:1) örneğine aittir.  $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$  (40:1),  $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$  (20:1),  $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$  (5:1) örneklere ait minimum yansıma değerleri sırasıyla %9.90 (650 nm), %10 (745 nm), %18.40 (520 nm) olarak ölçüldü.

Tablo 20.  $\text{SiO}_2\text{Nprt}$  katkılı  $\text{SiO}_2$  ince filmlerin katkılama oranına bağlı yansıma değerleri

Numune	Ort. Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
$\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$ (5:1)	27.80	18.40	520
$\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$ (20:1)	10.95	10.00	745
$\text{SiO}_2\text{-SiO}_2\text{Nprt}$ (40:1)	16.00	9.90	650

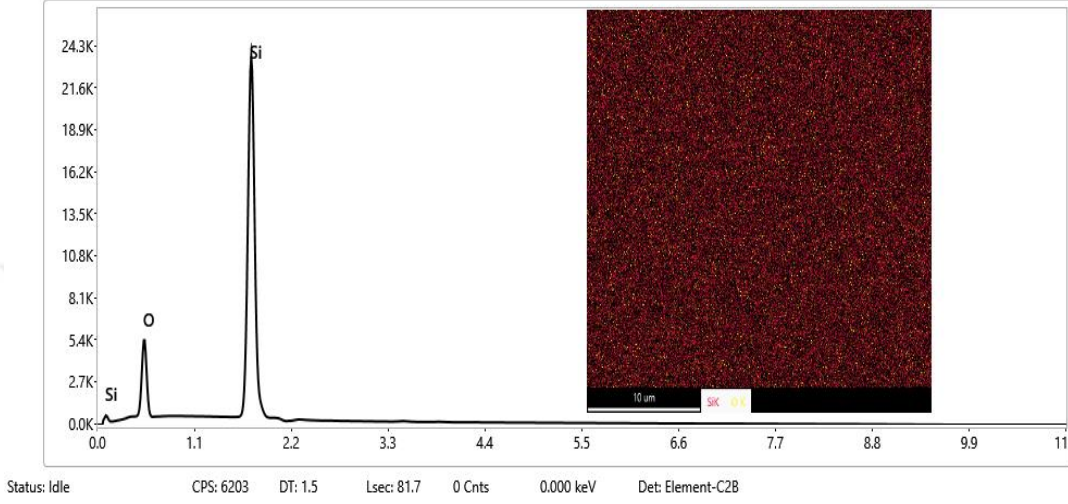
Şekil 59, c-Si altlığı üzerinde büyütülen  $\text{SiO}_2\text{Nprt}$  katkılı  $\text{SiO}_2$  ince filmlerin yüzey morfolojisini göstermektedir.  $\text{SiO}_2\text{Nprt}$  katkılı kaplamalarda gözenekli partiküllü yapısı ile çatlakların olduğu bir yüzey görülmektedir.



Şekil 59.  $\text{SiO}_2\text{Nprt}$  katkılı  $\text{SiO}_2$  ince filmlerin SEM görüntüleri



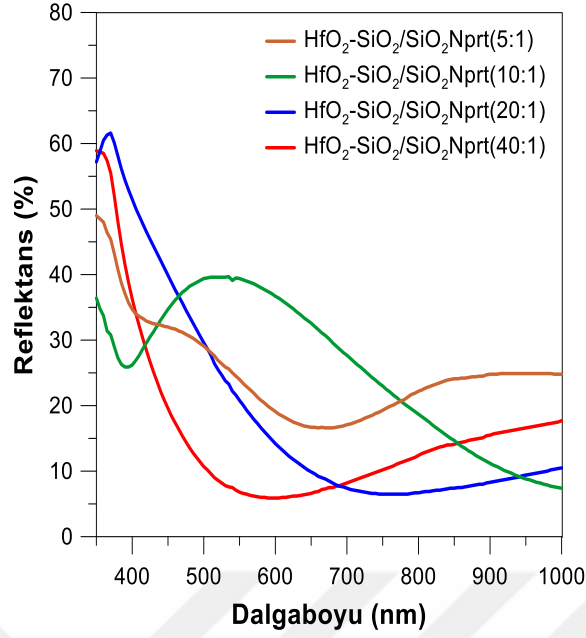
İnce filmlerde sadece numunenin yapısal morfolojisi değil element analizi de (EDAX) yapıldı. Şekil 60, SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin enerji dağılım X-ışını analizlerini göstermektedir. Dağılım şekli, ince filmin ağırlıklı olarak silisyum ve oksijeni içerdiğini gösterir, bu da silisyum oksidin varlığını göstermektedir.



Şekil 60. SiO<sub>2</sub> Nprt Katkılı SiO<sub>2</sub> İnce Filmlerinin Enerji Dağılım X-ışını Analizi (EDAX) Spektrumu

Son olarak HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> solüsyonuna 40:1, 20:1, 10:1, 5:1 oranlarında SiO<sub>2</sub>Nprt solüsyonu eklendikten sonra 50°C’de 10dk boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. 3500rpm kaplama hızı ile HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(40:1), HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(20:1), HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(10:1), HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(5:1) yapıları oluşturuldu ve hazırlanan numuneler 700°C tavlama sıcaklığında 90dk boyunca tavlandı.

Farklı oranlarda SiO<sub>2</sub>Nprt katkılama işlemi yapılan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ince filmlere ait reflektans-dalgaboyu grafiği Şekil 61’de verilmektedir. Ayrıca örneklere ait ortalama ve minimum reflektans değerleri Tablo 21’de gösterilmektedir. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışım solüsyonundaki SiO<sub>2</sub>Nprt oranı arttıkça ortalama ve minimum reflektans değerlerinin kötüleştiği görülmektedir. En düşük katkılama oranına sahip olan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Nprt(40:1) örneği için ortalama ve minimum yansıtma değerleri sırasıyla %15.72 ve %5.90 iken en yüksek katkılama oranına sahip HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(5:1) örneği için bu değerler sırasıyla %25.07 ve %16.60 olarak ölçüldü.

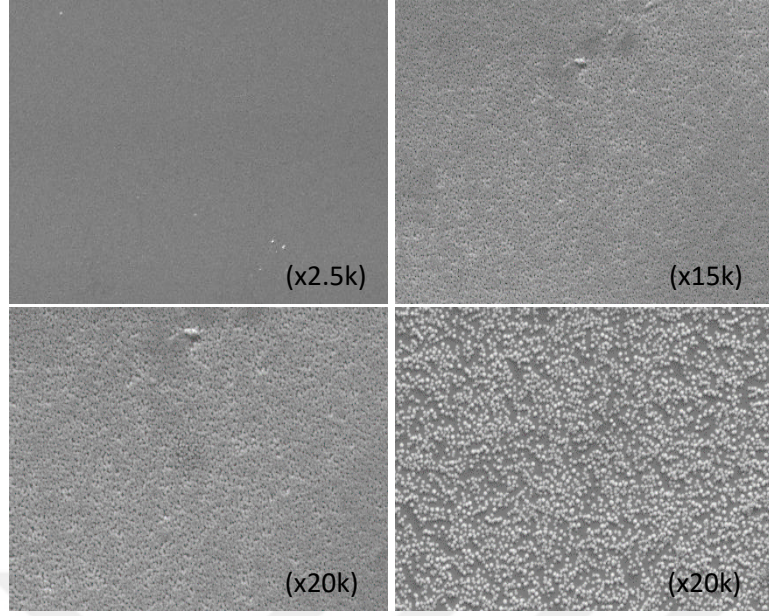


Şekil 61. SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ince filmlerin katkılama oranına bağlı reflektans grafiği

Tablo 21. SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> karışımı ince filmlerin katkılama oranına bağlı ortalama ve minimum reflektans değerleri

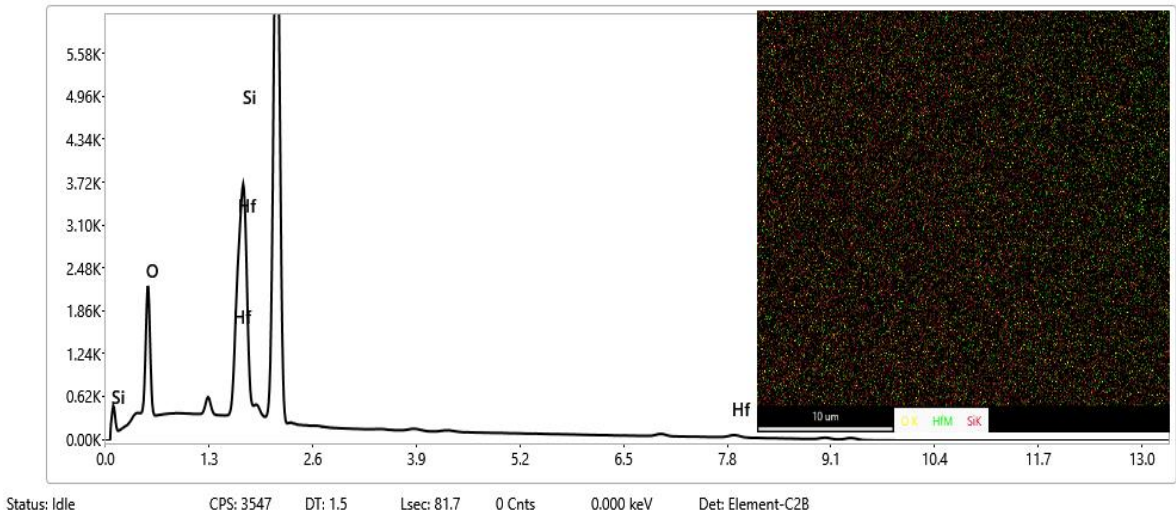
Numune	Ortalama Ref. (350-1000nm)	Min. Ref (%)	Min. Ref. noktası (nm)
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (5:1)	25.07	16.60	675
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (10:1)	25.63	7.40	1000
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (20:1)	19.16	6,50	765
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt (40:1)	15.72	5.90	598

Hazırlanan örneklerin yüzey morfolijisini incelemek için SEM ve element analizi yapmak için EDAX ölçümleri alındı. 3500 rpm kaplama hızıyla c-Si yüzeyine kaplanan ve 700°C'de 90 dk boyunca tavlanan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>Nprt(5:1) ince filminin yüzey morfolojisi Şekil 62'de gösterilmektedir.



Şekil 62. SiO<sub>2</sub>/Nprt katkılı HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ince filmlerin SEM görüntüleri

Nprt yapıları SiO<sub>2</sub> ince filminin oluştuğu ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 63, SiO<sub>2</sub>/Nprt katkılı HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ince filmlerin element analizlerinin yapıldığı EDAX ölçümlerini göstermektedir. Dağılım şekline bakıldığında, ince filmin ağırlıklı olarak silisyum hafniyum ve oksijeni içerdiği görülmektedir, bu da HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ince filminin oluştuğunu gösterir.



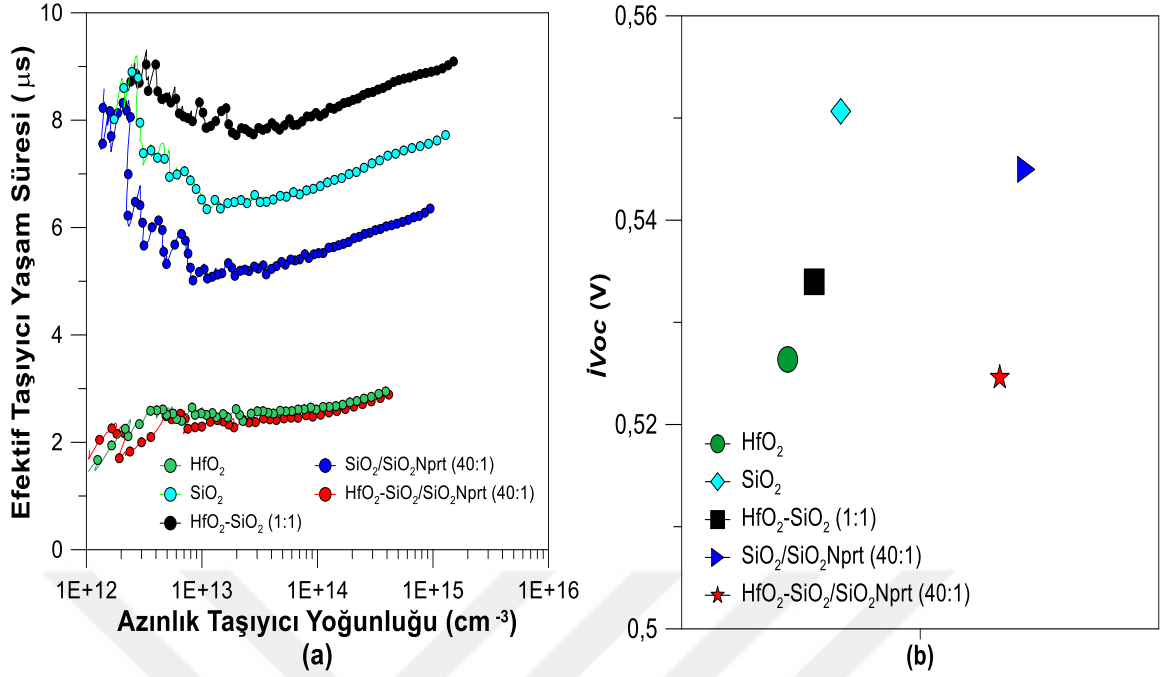
Şekil 63. SiO<sub>2</sub>/Nprt katkılı HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ince filmlerinin enerji dağılım X-Işını analizi (EDAX) spektrumu

### 3.6. HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Np<sub>rt</sub> Katkılı İnce Filmlerinin Pasivasyon Etkisi

Bu bölümde şu ana kadar optimize edilerek hazırlanan solüsyonlarla HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonları, HfO<sub>2</sub>/p-Si/ HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/p-Si/ SiO<sub>2</sub> ve son olarak HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının karışımlarından oluşan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonu ile HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sandviç yapıları oluşturularak pasivasyon etkileri araştırıldı. Deneyleerde 3.5 cm x 3.5 cm boyut ve 525 µm kalınlığında çift tarafı parlatılmış p-tipi CZ-Si (100) altlıklar kullanıldı. Altlıklar, 15 dk boyunca ultrasonik olarak sırayla etanol ve su ile temizlenip havayla kurutulduktan sonra HF asidine (1:5 hacim oranında seyreltilmiş) daldırıldı, ardından saf suda bir durulama işlemi gerçekleştirildi. Son olarak tekrar havayla kurutma işlemi uygulandı ve kaplama işlemine hazır hale getirildi.

Altlıkların temizlenmesi aşamasından sonra önceden optimize edilmiş olan HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve bu solüsyonların karışımı olan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonları ile altlıkların her iki yüzeyi dönel kaplama yöntemi ile kaplandı. Karakterizasyonlar için X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDAX), fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR), yüzey yansıtıcılığı ve efektif taşıyıcı yaşam süresi ölçümleri yapıldı.

Deneyleere HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> solüsyonları ile HfO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/p-Si/SiO<sub>2</sub> sandviç yapıları, HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının karışımlarından oluşan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonu ile HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sandviç yapısı ve son olarak HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonlarına SiO<sub>2</sub>Np<sub>rt</sub> katkısı yapılarak benzer sandviç yapıları oluşturularak başlandı. Deneyleer, p-tipi kristal silisyumun her iki yüzeyi HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filmleri kaplanarak gerçekleştirildi. HfO<sub>2</sub>/p-Si/ HfO<sub>2</sub> sandviç yapısı HfO<sub>2</sub> ince filmi için önceden belirlemiş olduğumuz optimum koşul olan 3500 rpm kaplama hızı, 700°C'de 120 dk tavlanaarak elde edildi. Aynı şekilde daha önceden belirlemiş olduğumuz 4000rpm kaplama hızı ve 950°C'de 7 dk tavlama süresi ile SiO<sub>2</sub>/p-Si/SiO<sub>2</sub> yapısı elde edildi. HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının karışımı için yapmış olduğumuz optimizasyon neticesinde HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sandviç yapısı 3500 rpm kaplama hızı ve 700°C'de 90 dk tavlama süresi göz önüne alınarak hazırlandı.

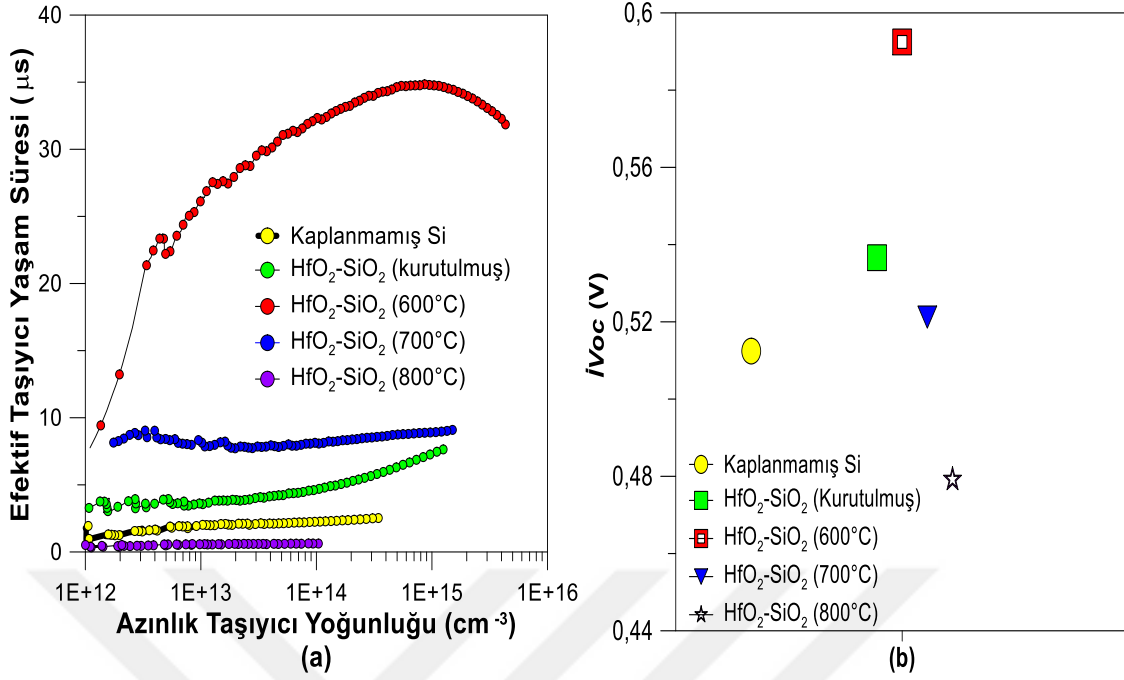


Şekil 64.  $HfO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $HfO_2-SiO_2(1:1)$ ,  $SiO_2/SiO_2Nprt(5:1)$  ve  $HfO_2-SiO_2/SiO_2Nprt(40:1)$  optimum solüsyonları için efektif taşıyıcı yaşam sürelerine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğu (a) ve  $iV_{oc}$  Değerleri (b) grafiği

Şekil 64(a)  $HfO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $HfO_2-SiO_2(1:1)$  ve  $SiO_2Nprt$  katkısı yapılarak hazırlanan ince filmlerin efektif taşıyıcı yaşam süresine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğu grafiğini göstermektedir.  $HfO_2$ ,  $SiO_2$  ve  $HfO_2-SiO_2$  karışımı ince filmlerin aynı azınlık taşıyıcı yoğunluk değerine karşılık gelen taşıyıcı yaşam süreleri sırasıyla  $2.94 \mu s$ ,  $7.29 \mu s$  ve  $8.63 \mu s$  olarak ölçüldü.

Elde edilen bu değerlere bakıldığında  $HfO_2-SiO_2$  karışımından oluşan ince filmin efektif taşıyıcı süresinin daha yüksek olduğu görüldü.  $SiO_2Nprt$  katkılı  $HfO_2-SiO_2(1:1)$  ince filmlerine bakıldığında  $SiO_2/SiO_2Nprt(5:1)$  örneği için efektif taşıyıcı yaşam süresi  $6.04 \mu s$  iken bu değer  $HfO_2-SiO_2/SiO_2Nprt(40:1)$  örneği için  $2.88 \mu s$  olarak ölçüldü. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda  $SiO_2Nprt$  katkısının pasivasyon etkisi olduğu görülmektedir.

Yapılan analizler neticesinde  $HfO_2-SiO_2(1:1)$  karışımı ile üretilen numunelerin taşıyıcı yaşam süreleri diğer numunelere göre daha yüksek olduğu için deneylere  $HfO_2-SiO_2(1:1)$  karışımı üzerinden devam edildi.

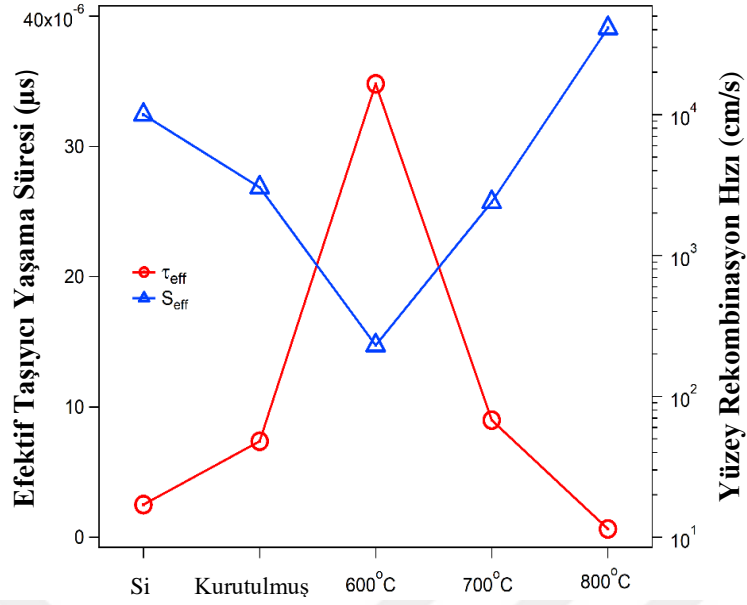


Şekil 65. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filminin farklı tavlama sıcaklıklarındaki efektif taşıyıcı yaşam sürelerine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğu (a) ve örneklerin  $iV_{oc}$  değerleri (b) grafiği

Şekil 65(a) HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonunun farklı tavlama sıcaklıklarındaki efektif taşıyıcı yaşam süresine karşı azınlık taşıyıcı yoğunluğunun grafiğini göstermektedir. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışım solüsyonu ile hazırlanan örnekler 600°C'den 800°C'ye kadar 100°C'lik adımlarla tavlansak HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sandviç yapısı üzerinde tavlama sıcaklığının etkisi araştırıldı.

Şekil 65(b) 1Sun daki  $iV_{oc}$  değerlerini göstermektedir. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(600°C) örneği 0.59 V'luk en yüksek  $iV_{oc}$  değerine sahipken 0.48 V'luk değerle HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(800°C) örneği için en düşük  $iV_{oc}$  değeri elde edildi.

Efektif taşıyıcı yaşam süreleri ( $\tau_{eff}$ ) yarı kararlı durum foto iletkenlik bozunma ölçümleri [108] ile ölçülmüş ve karşılık gelen difüzyon uzunluğu (L) ve yüzey rekombinasyon hızları ( $S_{eff}$ ) sırasıyla denklem (3.3.) ve (3.4) kullanılarak hesaplandı [109]. Ayrıca tavlama sıcaklığına bağlı olarak efektif taşıyıcı yaşam süresinin yüzey rekombinasyon hızları ile karşılaştırılması Şekil 66'da verilmektedir.



Şekil 66. Farklı sıcaklıklarda tavllanmış HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filmine efektif taşıyıcı yaşam süreleri ve bunlara karşılık gelen yüzey rekombinasyon hızlarının karşılaştırılması

$\tau_{eff}$ , taşıyıcı yoğunluğunun  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  olduğu durumlardaki değeri göstermektedir. Karşılığı olmadığı durumda kullanılan değerler ise Tablo 22'de görülmektedir. Kullanılan altlığın taşıyıcı yaşam süresi üreticiden edinilen bilgiye göre  $50 \mu\text{s}$  olarak alındı.  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  katkılama yoğunluğundaki taşıyıcı difüzyonu (D)  $30.44 \text{ cm}^2/\text{s}$  olarak alınmıştır [110]. Altlık kalınlığı (W) ise  $525 \mu\text{m}$ 'dur.

$$L = \sqrt{\tau_{eff}D} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{2S_{eff}}{W} \quad (3.4)$$

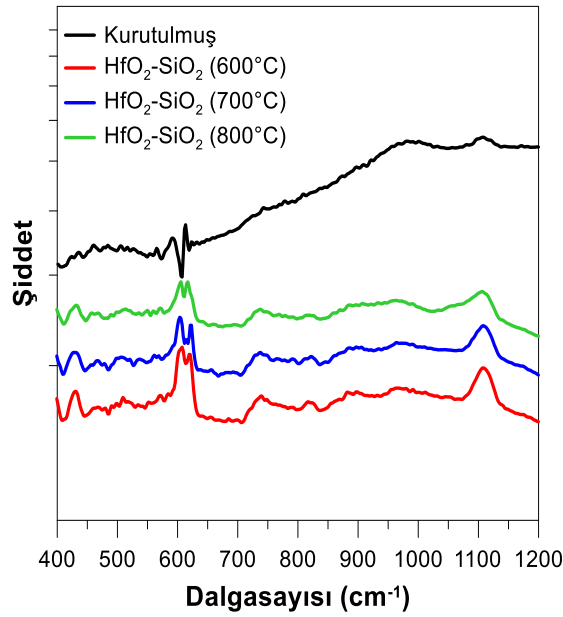
Tablo 22. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filminin tavlama sıcaklığına bağlı efektif taşıyıcı yaşam süreleri ve bunlara karşılık gelen difüzyon uzunluğu ile numunelerin yüzey rekombinasyon hızları

Tavlama Sıcaklığı (°C)	$\tau_{eff}$ (μs)	Azınlık taşıyıcı yoğunluğu (cm <sup>-3</sup> )	L (μm)	S <sub>eff</sub> (cm/s)
Kaplanmamış Si	2.5	$3 \times 10^{14}$	87.2	9975
65	7.36	$1 \times 10^{15}$	149.7	3041
600	34.78	$1 \times 10^{15}$	325.4	230
700	8.99	$1 \times 10^{15}$	165.4	2395
800	0.63	$1 \times 10^{14}$	43.8	41141

Taşıyıcı yaşam süresinin artışı ile difüzyon uzunluğu artar ve yüzey rekombinasyon hızı azalır, bu da azalan rekombinasyon hızı nedeniyle yüksek taşıyıcı yaşam süresi için daha uzun bir difüzyon uzunluğuna neden olur. Kaplanmamış silisyumun efektif taşıyıcı yaşam süresi 2.25  $\mu\text{s}$  iken kaplanıp sadece kurutma işlemi uygulanmış numunenin efektif taşıyıcı yaşam süresi 5.42  $\mu\text{s}$  olarak ölçüldü. Ancak 600°C'de tavllanmış numunenin efektif taşıyıcı yaşam süresi kayda değer bir artış göstererek 32.08  $\mu\text{s}$  olduğu gözlemlendi. Bu da difüzyon uzunluğunun (L) 312.5  $\mu\text{m}$  ve yüzey rekombinasyon hızının ( $S_{\text{eff}}$ ) 293 cm/s olması ile sonuçlandı. Örneklerin 700°C ve 800°C sıcaklığında tavlانmaları L'de azalma,  $S_{\text{eff}}$ 'de önemli bir artış,  $\tau_{\text{eff}}$ 'de ise keskin bir düşüşe sebep oldu.

Tavlama işlemi pasivasyonu tetiklese de 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tavlendiğinde  $\tau_{\text{eff}}$ 'in azalması, kaplanmış katmandaki artan tuzaklardan kaynaklanan kusurlara bağlanabilir [111]. Buna göre, yüksek arayüzey rekombinasyon hızı, düşük taşıyıcı yaşam süresine neden olan yüksek arayüzey tuzak yoğunluğu olarak yorumlanabilir.

Pasivasyon ile ilgili arayüzeylerdeki bağlanma konfigürasyonlarını anlamak için FTIR spektroskopisi ölçümleri yapıldı. Şekil 67, 65°C'de kurutulmuş, 600°C, 700°C ve 800°C'de tavllanmış numunelerin FTIR spektrumlarını göstermektedir. 512, 600, 623 ve 740 ve 750  $\text{cm}^{-1}$ 'deki soğurma pikleri Hf-O bağlanma konfigürasyonlarına [111-113], 820, 1000, 1108  $\text{cm}^{-1}$ 'deki piklerin Si-O bağlarından kaynaklanmaktadır [113-115].

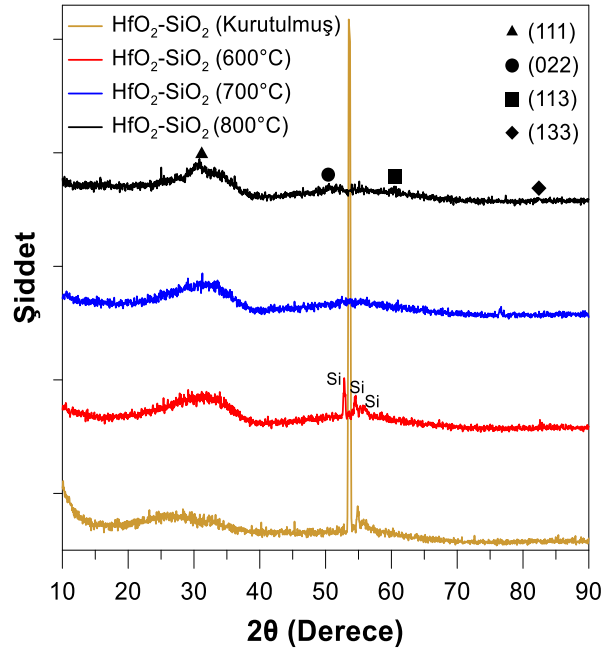


Şekil 67. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (1:1) karışımı ince filmlerin 600°C, 700°C ve 800°C'de tavllanmış FTIR soğurma spektrumları



Tüm numuneler  $820$  ve  $1108\text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O piklerine sahiptir, bunun da silisyum ve  $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2(1:1)$  film arasında  $\text{SiO}_x$  arayüzey katmanlarının varlığını gösterdiği değerlendirilmiştir. Pik yoğunluğu  $65^\circ\text{C}$ 'de düşük olmasına rağmen  $600$ ,  $700$  ve  $800^\circ\text{C}$  tavlama sıcaklıklarında pik yoğunluğu artmıştır. Bu artış filmin içeriğinden ziyade daha kalın  $\text{SiO}_2$  arayüz katmanlarına atfedilebilir [113, 115, 116].  $\text{SiO}_2$  arayüzey katmanı, arayüzey kusur yoğunluğunu azaltarak iyi bir pasivasyona yol açabilir.  $600$  ve  $623\text{ cm}^{-1}$ 'deki Hf-O pikleri,  $700$  ve  $800^\circ\text{C}$ 'de tavllanmış numunelere kıyasla nispeten daha yüksek yoğunluklara sahiptir. Daha yüksek sıcaklıklarda tavlanan numunelerin tüm pik desenleri göz önüne alındığında,  $600^\circ\text{C}$ 'de tavlanan filmlerin  $580\text{-}640\text{ cm}^{-1}$  Hf-O tepe noktaları ve  $820$  ve  $1108\text{ cm}^{-1}$  Si-O tepe noktaları aralığında biraz daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Filmlerin yapısını analiz etmek için, Şekil 68'de verildiği gibi,  $10\text{-}90^\circ$  aralığında XRD analizleri gerçekleştirildi.  $30^\circ$  civarında bir tepe çıkıntısı, kristalleşmeye doğru amorf  $\text{HfO}_2$ 'ye atfedilebilir [117-119].  $53^\circ$  ve  $56^\circ$  civarında pikler Silisyum altlık (ICSD card no:98-010-9036) ile ilişkilendirilebilir [117, 120]. Literatürde, silisyum altlık için yaklaşık  $53.5^\circ$  civarında güçlü bir pik noktası atfedilirken,  $54.1^\circ$  ve  $55.7^\circ$ 'daki pikler sırasıyla (202) ve (310) düzlemleriyle ilişkilendirilmesine de rastlanılmaktadır [121].



Şekil 68.  $\text{HfO}_2\text{-SiO}_2(1:1)$  karışımı ince filmlerin  $600^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$  ve  $800^\circ\text{C}$ 'de tavllanmış XRD grafiği

Bununla birlikte, 55° civarındaki tepe silisyuma ait olabilir ve amorf olma olasılığı daha yüksek olan kurutulmuş filmler için aynı yönelim gözlemlenmiştir. Numuneler 700 ve 800°C'de tavlendiğinde piklerin 53°-56° civarında zayıflaması, silisyum altlığın saptanmasını engelleyen filmlerin homojen olmamasından ve kalınlık farkından kaynaklanıyor olabilir. 30° civarındaki geniş pikin yüksek sıcaklıklarda (700°C ve 800°C) artması kristalliğin bir göstergesi olarak yorumlanabilir [121-123]. 30.7°, 50.9°, 60.6°, 83.0°'da görünen pikler (ICSD kart no: 98-017-3967)'ye göre (111), (022), (113) ve (133) kübik HfO<sub>2</sub>'ye karşılık gelmektedir. 700 ve 800°C'de kristallenme arayüzeydeki SiO<sub>2</sub>'nin incelmeye sebep olmuş olabilir. Bu da 600°C de tavlanan örneklerde daha kalın SiO<sub>2</sub> arayüzeyi olduğunu desteklemektedir [113].

Bu sonuçlar, 600°C'de tavlama sonrası kaplanmış numunelerin iyileştirilmiş efektif taşıyıcı yaşam sürelerinin, daha büyük tanelerde kusurların azaltılmasına katkıda bulunan HfO<sub>2</sub>'nin amorf yapısına eklenen SiO<sub>2</sub> kristalizasyonunun varlığından kaynaklanabileceğini göstermektedir. Genel olarak, Silisyum altlığın HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyon bazlı ince filmler ile kaplanarak 600°C veya 700°C de tavlama sonucu silisyum yüzeyinin ortalama yansımalarını %35'ten %15'e düşürerek iyi bir yansıma önleyici özellik sunduğu sonucuna varılabilir. Bununla birlikte 600°C tavlama sonrası örneğin daha iyi pasivasyon özelliği gösterdiği söylenebilir. Daha kalın SiO<sub>2</sub> arayüzey tabakası, bu tür pasivasyon sonuçlarında önemli bir rolü sahip olabilir. Bu sonuçlar güneş hücreleri de dahil olmak üzere silikon bazlı yarı iletken cihazlarda uygulama için çekici olsa da özellikle pasivasyon özelliklerinin daha iyi anlaşılması için daha fazla analize ihtiyaç vardır.

### 3.7. Geliştirilen Katmanların Güneş Hücrelerine Uygulanması ve Simülasyonu

Elde edilen optimum HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> (1:1) ve SiO<sub>2</sub>Npr katkılı ince filmler yansıma önleyici olarak uygulanmadan önce optimum bir güneş hücresi elde etmek için Afors-Het yazılımı [124] ile birinci aşamada kristal silisyum güneş hücrelerinin verimliliğini önemli ölçüde artıran BSF kalınlığı ve BSF katkı konsantrasyonunun optimizasyonu gerçekleştirildi. İkinci aşama da ise uygun BSF kalınlığı için uygulanması gereken Al miktarı ve tavlama sıcaklığı gibi hesaplamalar Al-Si faz diyagramı kullanılarak elde edildi.

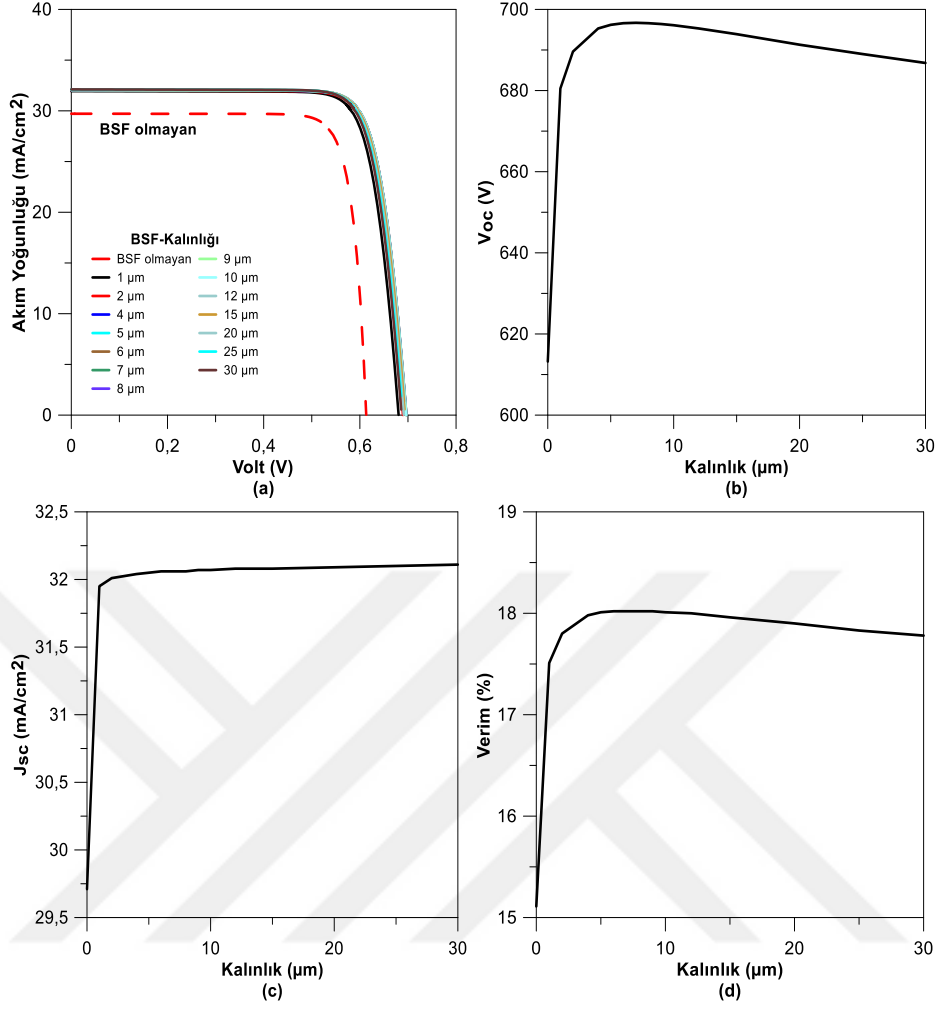
### 3.7.1. BSF Katmanının Kalınlık ve Katkı Konsantrasyonunun Optimizasyonu

Kalınlık ve katkı konsantrasyonunun güneş hücresi performansı üzerindeki etkisi özel olarak araştırıldı ve ilk olarak, BSF kalınlığının güneş hücresi verimliliği üzerindeki etkileri incelendi. Diğer parametreler sabit tutulurken BSF'nin kalınlığı 1  $\mu\text{m}$  ila 30  $\mu\text{m}$  arasında değiştirildi. Uygun BSF kalınlığı belirlendikten sonra kalınlık sabit değerde tutulup katkı konsantrasyonu  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'ten  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 'e değiştirilerek BSF katkı konsantrasyonunun verimlilik üzerindeki etkisi analiz edildi. Güneş hücresine ait bazı başlangıç parametreleri Tablo 23'te özetlenmektedir.

Tablo 23. Afors-Het yazılımında kullanılan bazı güneş hücresi başlangıç parametreleri

Emiter kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	0.3
Emiter katkı konsantrasyonu ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1 \times 10^{20}$
Yansıtıcılık (%)	8
Base kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	200
Base katkı konsantrasyonu ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.5 \times 10^{16}$
BSF katkı konsantrasyonu ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.0 \times 10^{19}$
Seri direnç ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	0.8
Paralel direnç ( $\Omega \text{ cm}^2$ )	10000

BSF kalınlığının optimizasyonu için kalınlık değerleri 1  $\mu\text{m}$  ila 30  $\mu\text{m}$ 'ye kadar değiştirilerek güneş hücresi verimi üzerindeki etkisi araştırıldı. I-V karakteristikleri ve BSF kalınlığına bağlı akım yoğunluğu Şekil 69'da gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen güneş hücresi karakteristik değerleri Tablo 24'te gösterilmektedir.

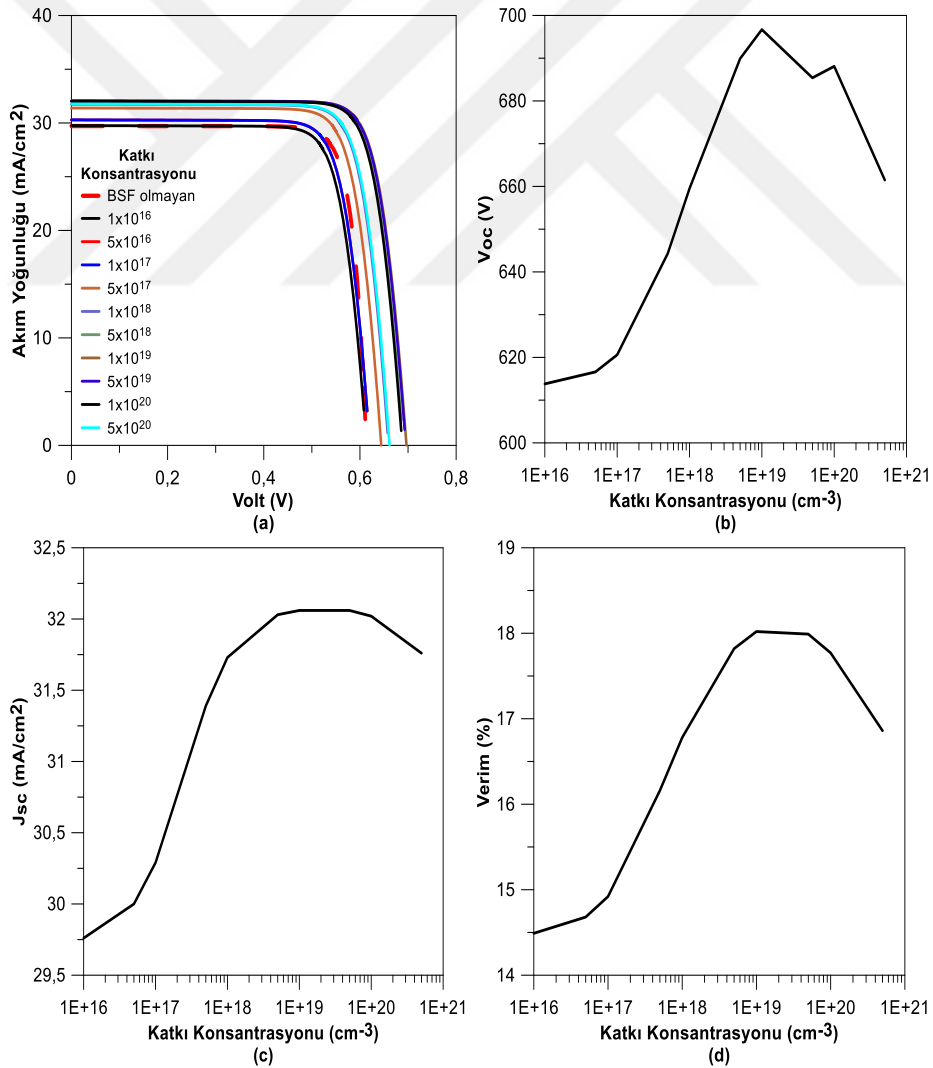


Şekil 69. BSF kalınlığına bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri

Tablo 24. BSF kalınlığına bağlı c-Si güneş hücresi elektriksel karakteristikleri

BSF Kalınlık (μm)	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eff (%)
1	680.50	31.95	80.55	17.51
2	689.60	32.01	80.63	17.80
4	695.30	32.04	80.69	17.98
5	696.20	32.05	80.70	18.01
6	696.60	32.06	80.69	18.02
7	696.70	32.06	80.69	18.02
8	696.60	32.06	80.69	18.02
9	696.40	32.07	80.69	18.02
10	696.10	32.07	80.69	18.01
12	695.30	32.08	80.69	18.00
15	693.90	32.08	80.69	17.96
20	691.30	32.09	80.68	17.90
25	689.00	32.10	80.62	17.83
30	686.80	32.11	80.62	17.78

BSF kalınlığının artmasıyla hücrenin güneş hücresi akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) 31.95 mA/cm<sup>2</sup>'den 32.11 mA/cm<sup>2</sup>'ye arttığı görüldü. Ayrıca BSF kalınlığının artmasıyla güneş hücresinin açık devre voltajının ( $V_{oc}$ ) arttığı gözlemlendi ve 7  $\mu$ m BSF kalınlığında maksimum 696.70 mV değerine ulaştı. Bununla birlikte, BSF kalınlığı 7  $\mu$ m'den daha büyük kalınlıklarda  $V_{oc}$  değerinin azaldığı görüldü. Tablo 24'ten görüldüğü gibi artan BSF kalınlığı ile güneş hücresin veriminin arttığı ve BSF kalınlığının 7  $\mu$ m olması durumunda  $V_{oc}$ 'nin biraz daha yüksek olduğu BSF kalınlığı 6  $\mu$ m ile 9  $\mu$ m arasında %18.02'de verim değeri elde edildi. BSF kalınlığı için bu sonuçlar BSF kalınlığının deneysel değeri 6.80  $\mu$ m ile uyumlu olduğu görülmektedir [86]. Başka bir çalışmada, en iyi multi ve monokristal hücreler için %50 Al kaplı kontaklar için FF değerlerinin %78 ve %77 olduğu durumda 5  $\mu$ m ila 7  $\mu$ m lokal BSF kalınlıkları elde edildi [125].



Şekil 70. BSF katkı konsantrasyonuna bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri

Tablo 25. BSF katkı konsantrasyonuna bağlı c-Si güneş hücresi karakteristik grafikleri

BSF Na ( $\text{cm}^{-3}$ )	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	Eff (%)
$1 \times 10^{16}$	613.8	29.76	79.32	14.49
$5 \times 10^{16}$	616.6	30.00	79.37	14.68
$1 \times 10^{17}$	620.6	30.29	79.39	14.92
$5 \times 10^{17}$	644.3	31.39	79.89	16.16
$1 \times 10^{18}$	659.5	31.73	80.18	16.78
$5 \times 10^{18}$	689.9	32.03	80.62	17.82
$1 \times 10^{19}$	696.7	32.06	80.69	18.02
$5 \times 10^{19}$	685.4	32.06	80.69	17.99
$1 \times 10^{20}$	688.1	32.02	80.63	17.77
$5 \times 10^{20}$	661.5	31.76	80.23	16.86

Kalınlık optimizasyonundan sonra BSF doping konsantrasyonunun c-Si güneş hücresinin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için BSF kalınlığı 7  $\mu\text{m}$ 'ye sabitlendi ve katkı konsantrasyonu  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'ten  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar değiştirildi. Tablo 25'te gösterildiği gibi, c-Si güneş hücresi için BSF katkı konsantrasyonunun  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'ten  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'e artması sonucunda  $V_{oc}$ ,  $FF$  ve  $J_{sc}$ 'de bir artış gözlemlendi. Şekil 70, c-Si güneş hücresinin  $I$ - $V$ ,  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  ve verimin katkı konsantrasyonuna bağlı elektriksel özelliklerini göstermektedir. BSF katkı konsantrasyonunun  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'ten  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'e yükselmesi sonucunda güneş hücresi verimliliği %14.49'dan %18.02'ye yükseldi. Ancak katkı konsantrasyonu  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'ten  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 'e yükseltildiğinde verimin %18.02'den %16.86'ya düştüğü görüldü. Bu sonuçlardan BSF'nin optimal katkı konsantrasyonu, %18.02 verimlilikle  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olarak kaydedildi. Optimum BSF katkı konsantrasyonu,  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ve  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'te benzer değerler civarında deneysel olarak rapor edildi [126].

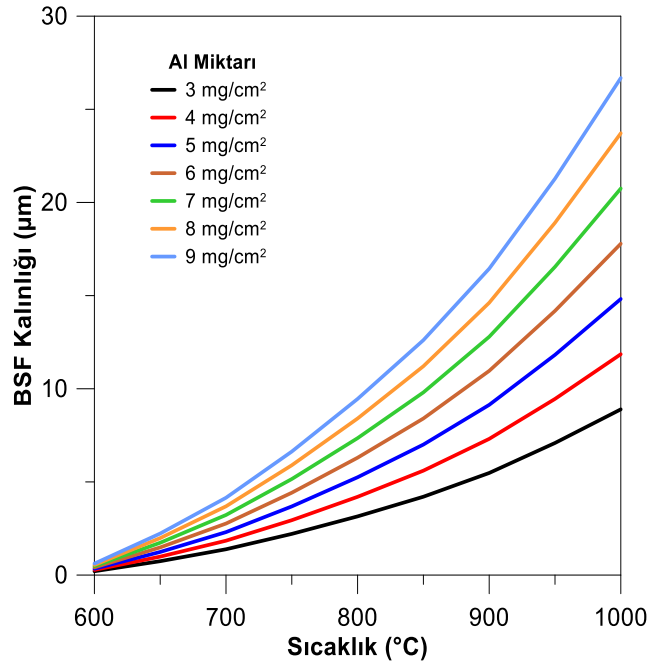
Tablo 26, optimize edilen BSF katmanına sahip c-Si güneş hücresinin elektriksel özellikleri ile BSF katmanı olmayan c-Si güneş hücresinin elektriksel özelliklerinin karşılaştırmasını özetlemektedir. Optimum BSF'li güneş hücresindeki verimlilik, BSF'siz hücreden önemli ölçüde daha yüksektir. Bu, c-Si güneş hücrelerinde BSF'nin önemini açıkça göstermektedir. Optimum BSF'li hücrenin  $V_{oc}$  değeri 696.70 mV iken BSF'siz hücrenin  $V_{oc}$  değeri 613.20 mV olarak kaydedildi. Sonuç olarak optimize edilmiş BSF'li hücrenin ve BSF'siz hücrenin verimi sırasıyla %18.02 ve %15.11 olarak elde edildi.

Tablo 26. Optimum BSF'li güneş hücresi parametrelerinin BSF'siz güneş hücresi parametreleriyle karşılaştırılması.

	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eff (%)
BSF Olmayan	613.2	29.71	82.92	15.11
Optimum BSF	696.7	32.06	80.69	18.02

### 3.7.2. BSF Katmanı İçin Optimum Al Miktarı ve Tavlama Sıcaklığının Belirlenmesi

Afors-Het yazılımı kullanılarak BSF kalınlığının ve katkı konsantrasyonunun optimizasyon çalışmasına ek olarak, BSF kalınlığının basılı Al pasta miktarına ve tavlama sıcaklığına bağlılığı Al-Si faz diyagramı ve eşitlik (1.103) ve (1.104) kullanılarak hesaplandı [85]. Al-Si alaşımındaki ötektik sıcaklıktaki silisyumun ağırlıkça oranı %12,6 literatürde en çok rapor edilen oran olduğundan hesaplamalarda kullanıldı [127-129]. BSF kalınlık hesaplanmasında Al miktarı 3 mg/cm<sup>2</sup>'den 9 mg/cm<sup>2</sup>'ye değiştirilerek her bir durum için optimum tavlama sıcaklığı belirlendi. Şekil 71'e göre elde edilen BSF kalınlığı, ya tepe tavlama sıcaklığının ya da basılan Al miktarının artmasıyla artmaktadır.



Şekil 71. Tepe tavlama sıcaklığı ve Al miktarına bağlı BSF kalınlığı

Yaklaşık 7  $\mu\text{m}$ 'lik optimum BSF kalınlığını elde etmek için tepe tavlama sıcaklığı, dikkate alınan basılı Al miktarına göre ayarlanmalıdır. Örneğin, 7  $\mu\text{m}$  BSF kalınlığı elde etmek için 3  $\text{mg}/\text{cm}^2$  Al miktarı kullanıldıysa, 950°C'ye kadar sıcaklık oluşturulmalıdır, Al miktarı 8  $\text{mg}/\text{cm}^2$  olduğunda 775°C'lik bir tavlama sıcaklığı yeterli olacaktır. Ortalama Al miktarının 6 veya 7  $\text{mg}/\text{cm}^2$  olduğu göz önüne alındığında, 7  $\mu\text{m}$  Al-BSF oluşturmak için sırasıyla 825°C ve 800°C'lik bir tepe tavlama sıcaklığına ulaşılması gerekmektedir. Tablo 27, sıcaklığa ve Al macun miktarına bağlı olarak hesaplanan BSF kalınlıklarını özetlemektedir.

Tablo 27. BSF kalınlığının tepe tavlama sıcaklığı ve Al macunu miktarına bağımlılığı

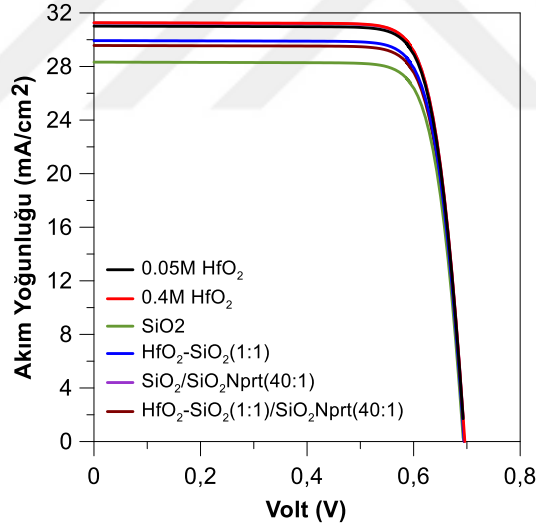
		$m_{\text{Al}} (\text{mg}/\text{cm}^2)$							
		3	4	5	6	7	8	9	
T (°C)	600	0.205	0.273	0.342	0.410	0.478	0.547	0.615	BSF Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
	625	0.415	0.555	0.693	0.832	0.970	1.109	1.248	
	650	0.743	0.992	1.239	1.487	1.735	1.983	2.231	
	675	0.989	1.319	1.649	1.979	2.308	2.638	2.968	
	700	1.382	1.843	2.305	2.766	3.227	3.687	4.148	
	725	1.796	2.395	2.994	3.593	4.192	4.791	5.390	
	750	2.209	2.946	3.683	4.419	5.156	5.892	6.629	
	775	2.667	3.556	4.446	5.335	6.224	7.114	8.003	
	800	3.151	4.201	5.252	6.302	7.352	8.402	9.453	
	825	3.609	4.812	6.016	7.219	8.422	9.625	10.828	
	850	4.203	5.604	7.005	8.406	9.806	11.208	12.609	
	875	4.747	6.329	7.912	9.494	11.076	12.659	14.241	
	900	5.481	7.308	9.135	10.962	12.789	14.616	16.443	
	925	6.035	8.047	10.059	12.070	14.082	16.094	18.106	
	950	7.091	9.455	11.819	14.182	16.546	18.910	21.274	
975	7.817	10.423	13.029	15.634	18.241	20.846	23.452		
1000	8.893	11.857	14.822	17.786	20.750	23.715	26.679		

Bu optimizasyon ve sonuçlar, BSF'nin c-Si güneş hücrelerinin performansı üzerindeki etkisini anlamak için destekleyicidir. Daha da önemlisi, bu bulgular, Al macunu ile daha ince altlıklara sahip güneş hücrelerinin araştırılmasına yardımcı olacak ve elde edilen BSF kalınlığı arasındaki ilişkiyi anlamak için faydalı olacaktır.



### 3.7.3. HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt Katkılı İnce Filmlerinin C-Si Güneş Hücrelerine Yansımaya Önleyici Kaplama Olarak Uygulanması

Önceki bölümlerde elde ettiğimiz optimum HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince filmleri Afors-Het yazılımı [124] kullanılarak c-Si güneş hücreleri üzerinde yansımaya önleyici etkisi araştırıldı. Hazırlanan her bir ince film için elde edilen ortalama yansımaya değerleri; Tablo 23'te gösterilen emiter kalınlığı, emiter katkı konsantrasyonu, taban kalınlığı, taban katkı konsantrasyonu, seri direnç, paralel direnç ve optimizasyonu gerçekleştirilen arka yüzey alanı (BSF) kalınlığı (7 µm), BSF katkı konsantrasyonu (1x10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>) gibi bazı c-Si güneş hücresi başlangıç parametreleriyle birlikte kullanılarak verim değerleri elde edildi. HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince filmleri için elde edilen I-V grafiği Şekil 72'de gösterilmektedir. Ayrıca her bir güneş hücresinin karakteristik parametreleri Tablo 28'de özetlenmektedir. Yansımaya önleyici kaplamasız güneş hücresinin güç dönüşüm verimi (PCE) %11.68 olarak belirlenirken, düşük molariteli (0.05M) HfO<sub>2</sub> ile kaplanmış güneş hücresinin verimi %17.43 olarak belirlendi.



Şekil 72. Kaplamasız ve HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince film kaplı güneş hücrelerinin I-V grafiği

Yüksek molariteli HfO<sub>2</sub> ince filminin uygulandığı güneş hücresi için kısa devre akım yoğunluğunun ( $J_{sc}$ ) 20.87'den 31.27 mA/cm<sup>2</sup>'ye ve açık devre voltajının ( $V_{oc}$ ) 685.10'dan 696.10 mV'ye yükseltilmesi sonucu yaklaşık olarak %6 verim artışı sağlandı. Güneş hücrelerinin yüzeyinde yansımaların azalması,  $J_{sc}$  ve  $V_{oc}$  artışının güç dönüşüm verimi

üzerindeki benzer etkileri, literatürde de pratik olarak bildirilmiştir [130, 131]. Bu da YÖ kaplamaların güneş hücresi üzerindeki önemini ve büyük etkisini doğrulamaktadır.

Tablo 28. Kaplamasız ve HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince film kaplı güneş hücresi karakteristikleri

	J <sub>SC</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>OC</sub> (mV)	FF (%)	Eff (%)
Yansıma Önleyici Kaplamasız	20.87	685.10	81.64	11.68
0.05M HfO <sub>2</sub>	31.01	695.90	80.78	17.43
0.4M HfO <sub>2</sub>	31.27	696.10	80.76	17.58
SiO <sub>2</sub>	28.33	693.40	81.01	15.91
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1)	29.93	694.90	80.88	16.82
SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> Nprt(40:1)	31.24	694.40	80.92	16.56
HfO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> (1:1)/SiO <sub>2</sub> Nprt(40.1)	29.57	694.50	80.91	16.62

Yapılan deneylerde HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ve SiO<sub>2</sub>Nprt katkılı ince filmlerin tamamı yansıma önleyici etki gösterip güç dönüşüm verimliliğini arttırdığı görüldü. Ancak en yüksek güç dönüşüm verimi %17.58'lik değerle yüksek molariteli (0.4M) HfO<sub>2</sub> ince filmi ile elde edildi.

#### 4. SONUÇ

'Kristal Silisyum Güneş Hücreleri Uygulamaları İçin HfO<sub>2</sub> Tabanlı Yansımaya Önleyici ve Pasivasyon Etkili Katmanların Geliştirilmesi' başlığı ile doktora tezi kapsamında çalışmalar yapıldı. Araştırmalar HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin yansımaya önleyici ve pasivasyon etkili katmanların geliştirilmesi şeklinde iki aşamada gerçekleştirildi. Solüsyon bazlı HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin oluşturulabilmesi için öncelikle solüsyon çalışmaları ve farklı oranlarda hafniyum ve çözücü içerikli solüsyonlar hazırlanarak deneyler gerçekleştirildi. Oluşturulan ince filmlerin yüzeye tutunumu ve optiksel karakterizasyonlar neticesinde 0.4M hafniyum içerikli solüsyon ideal olarak belirlendi. Tavlama sıcaklığı ve süresi, kristallenme davranışı ve dönel kaplama hızı ile ince film kalınlık kontrolü sağlanıp optimize edilerek HfO<sub>2</sub> ince filmler için 3500 rpm kaplama hızı, 700°C tavlama sıcaklığı ve 120 dk tavlama süresi optimum olarak belirlendi. Bu sayede görünür ışık bölgesinde %0.3 minimum yansımaya noktasına sahip ortalama yansımaları (350-1000 nm) %10.87 olan ince film kaplı silisyum yüzeyler elde edildi. Bu şartlarda elde edilmiş olan film kalınlığı 71nm, kırınım indisleri ise 1.934 olarak belirlendi. Gözeneklilik ve doluluk yoğunluğu hesaplamaları yapılarak tavlama sıcaklığının etkisi de irdelendi. Tavlama sıcaklığı 500°C'den 700°C'ye çıkarıldığında gözeneklilik değerinin %19.12'den %17.52'ye düştüğü belirlendi. Tavlama sıcaklığı 800°C olduğunda ise gözeneklilik değeri %3.59'a kadar düştüğü görüldü. Bu nedenle 800°C'de tavlanan örneklerde indis değerinin çok yükselmesi (2.05) oluşan filmlerin yoğun oluşu ve gözenekliliğin azalmasından kaynaklandığı sonucuna varılabilir. 500°C ile 700°C'ler arasında tavlanan örneklerde yansımaya değerlerinin birbirine yakın olmasının kırınım indislerinin yaklaşık değerli olmasından kaynaklandığını doğruladı.

SiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> ikili katman ve HfO<sub>2</sub> ile SiO<sub>2</sub> solüsyonlarının yüzde elli oranında karışımı olan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonu ve SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> solüsyonları ile yansımaya önleyici ince filmler oluşturmak için SiO<sub>2</sub> solüsyonu, TEOS (C<sub>8</sub>H<sub>20</sub>O<sub>4</sub>Si-%99), etil alkol ve su 3:2:4 hacim oranı ile hazırlandı. Hazırlanan optimum SiO<sub>2</sub> ince filmi 4000rpm kaplama hızı, 950°C'de 7 dk tavlama süresi optimum değerler olarak kaydedildi. Hazırlanan optimum HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> solüsyonları ile öncelikle ikili katman çalışmaları gerçekleştirildi. HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin kalınlığı optimum değer olduğunu gösterdiğimiz yaklaşık 70 nm iken en iyi sonucun elde edildiği çift katmanlı yapıda SiO<sub>2</sub> kalınlığının yaklaşık 30 nm olduğu tahmin edilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre SiO<sub>2</sub>

katmanının 5 nm gibi değerlere düşürülmesi ile yansımanın önemli ölçüde düşürülebileceği görülse de uyguladığımız dönel kaplama yöntemi ile o kalınlıklara inilememiş ve SiO<sub>2</sub> solüsyonunda yapılan değişiklikler de yeterli sonuç elde edilemedi. Daha iyi sonuçlar için birkaç nm seviyelerinde SiO<sub>2</sub> katmanı oluşturulacak teknikler ile çalışmaların yapılması gerekmektedir.

HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> optimum solüsyonlarının yüzde elli oranında karıştırılması ile HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışım solüsyonu hazırlandı. Yapılan optimizasyonlar neticesinde kaplama hızı 3500rpm, tavlama sıcaklığı 700°C ve tavlama süresi 90dk olarak belirlendi. Elde edilen optimum HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) ince filmi için ortalama ve minimum yansıma değerleri sırasıyla %14.68 ve %4.30 olarak kaydedildi. Böylece yapılan çalışmada HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışımı oksit bazlı ince filmlerin iyi bir yansıma önleyici etkiye sahip olduğu ve güneş hücreleri de dahil olmak üzere yarı iletken cihazlar için umut verici olduğu sonucuna varılabilir.

Ayrıca SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkısının HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> solüsyonları üzerindeki etkisi araştırıldı. Yapılan deneylerde HfO<sub>2</sub> solüsyonuna yapılan SiO<sub>2</sub>Nprt katkısıyla homojen filmler oluşmadığı görüldü. Ancak SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) solüsyonlarına farklı oranlarda yapılan SiO<sub>2</sub>Nprt katkısı ile homojen filmler elde edildi ve gerekli karakterizasyonlar gerçekleştirildi.

İkinci aşamada, daha önceden optimize edilen HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve bunların yüzde elli oranında karışımı olan HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışım solüsyonları ile hazırlanan ince filmlerin pasivasyon özellikleri incelendi. Bütün solüsyonlar için düşük maliyetli dönel kaplama yöntemi kullanıldı. Pasivasyon etkisini araştırmak için HfO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/p-Si/SiO<sub>2</sub> ve HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/p-Si/HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> sandviç yapıları oluşturularak taşıyıcı yaşam süresi ölçümleri alındı. Oluşan filmlerin tavlama işleminden sonra fiziksel ve yansıma önleyici özelliklerinin bile benzer olduğu, tavlama sıcaklığı 600°C'nin üzerinde olduğunda taşıyıcı yaşam sürelerinin önemli ölçüde düştüğü sonucuna varıldı. Sonuçlar, filmlerin 600°C'de kristalleşmesinin, HfO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> etkileşiminin daha yüksek sıcaklıklarda daha güçlü hale geldiği durumlarda daha iyi bir arayüzey oluşturabileceğini gösterdi. HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışım solüsyonu ile kaplanmış silisyum altlık, 600°C'de tavlandıktan sonra 32 µs'lik efektif taşıyıcı yaşam süresi ölçüldü; bu, 2 µs'lik kaplanmamış Si'nin taşıyıcı yaşam süresine kıyasla nispeten arttığını göstermektedir.

Ayrıca ortalama yansıma değerlerinin Afors-het yazılımıyla c-Si güneş hücrelerine YÖ kaplama olarak uygulanması sonucunda yansıma önleyici kaplamasız güneş hücresinin güç dönüşüm verimi (PCE) %11.68 olarak belirlenirken, yüksek molariteli (0.4M) HfO<sub>2</sub> ile

kaplanmış güneş hücresinin verimi % 17.58 olarak elde edildi. Yüksek molariteli HfO<sub>2</sub> ince filminin uygulandığı güneş hücresi için kısa devre akım yoğunluğunun (J<sub>sc</sub>) 20.87'den 31.27 mA/cm<sup>2</sup>'ye ve açık devre voltajının (V<sub>oc</sub>) 685.10'dan 696.10 mV'a yükseltilmesi sonucu yaklaşık olarak %6 verim artışı sağlandı.

Bu çalışmada HfO<sub>2</sub> tabanlı ince film ve katmanlarının kristal silisyum güneş hücreleri için alternatif yansımayı önleyici ve pasivasyon etkili katman olarak güneş hücreleri dahil yarı iletken cihazlar için umut verici olduğu gösterilmektedir. Bu çalışmanın solüsyon tabanlı HfO<sub>2</sub> ince filmler hakkında bilgi birikimi oluşturması konusunda da yararlı bir çalışma olduğu ve bu alanda gelecek çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



## 5. ÖNERİLER

HfO<sub>2</sub> ince filmlerinin dönel kaplama yöntemi ile yansıma önleyici ve pasivasyon etkili katman olarak araştırılması başarılı bir şekilde gerçekleştirildi. Ancak ikili yansıma önleyici kaplamalarda ikinci katman olarak kullandığımız SiO<sub>2</sub> ince filmi dönel kaplama yöntemi ile istenilen kalınlıklara inilemediği için ikili katman yansıma önleyicilerde beklenen yansıma değerlerine ulaşamadı. Bu nedenle 70 nm kalınlığında kaplanan HfO<sub>2</sub> ince filmine ikinci katman olarak 5 nm kalınlığında SiO<sub>2</sub> ince filmini kaplayabilmek başka yöntemler kullanılması önerilir. Ayrıca textüre kristal silisyum yüzeyine yapılan ince film kaplamalarda çatlaklar ve tepecikler arasında birikmeler olduğu görüldü. Bu çatlakların giderilmesi için farklı solüsyon denemeleri ve kaplama yöntemleri denenebilir. Bunlara ilaveten HfO<sub>2</sub> solüsyonu ile SiO<sub>2</sub> solüsyonunun farklı oranlarda karıştırılması sonucu HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>(1:1) karışım solüsyonu ile başarılı ince filmler elde edilmiştir, benzer şekilde HfO<sub>2</sub> solüsyonuna başka malzeme katkılanması yapılarak deneyler gerçekleştirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Shafiee, S. ve Topal, E., When will fossil fuel reserves be diminished?, *Energy Policy*, 37,1 (2009) 181-189.
2. <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/turkiye-yenilenebilir-enerjide-avrupanin-ilk-5-ulkesi-arasina-girecek-436837.html>, 09.07.2020.
3. Mat Desa, M.K., Sapeai, S., Azhari, A.W., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., Amin, N. ve Zaidi, S.H., Silicon back contact solar cell configuration: A pathway towards higher efficiency, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60 (2016) 1516-1532.
4. Chen, J., Energy Efficiency Improvements in Smart Grid Components, Recent Developments on Silicon Based Solar Cell Technologies and their Industrial Applications, InTech, 2015.
5. Green, M.A., Dunlop, E.D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. ve Ho-Baillie, A.W., Solar cell efficiency tables (version 55), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28,NREL/JA-5900-75827 (2019).
6. Ferhati, H. ve Djefal, F., Role of non-uniform Ge concentration profile in enhancing the efficiency of thin-film SiGe/Si Solar Cells, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, (2017).
7. Wang, J., Ge, J., Hou, H., Wang, M., Liu, G., Qiao, G. ve Wang, Y., Design and sol-gel preparation of SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> multilayer antireflective coatings, *Applied Surface Science*, 422 (2017) 970-974.
8. Vitanov, P., Harizanova, A., Ivanova, T. ve Dimitrova, T., Chemical deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on Si substrates, *Thin Solid Films*, 517,23 (2009) 6327-6330.
9. Lien, S.-Y., Wu, D.-S., Yeh, W.-C. ve Liu, J.-C., Tri-layer antireflection coatings (SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) for silicon solar cells using a sol-gel technique, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90,16 (2006) 2710-2719.
10. Mahadik, D.B., Lakshmi, R.V. ve Barshilia, H.C., High performance single layer nano-porous antireflection coatings on glass by sol-gel process for solar energy applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140 (2015) 61-68.
11. Zhang, W., Tu, J., Long, W., Lai, W., Sheng, Y. ve Guo, T., Preparation of SiO<sub>2</sub> anti-reflection coatings by sol-gel method, *Energy Procedia*, 130 (2017) 72-76.
12. Uzum, A., Kuriyama, M., Kanda, H., Kimura, Y., Tanimoto, K., Fukui, H., Izumi, T., Harada, T. ve Ito, S., Sprayed and spin-coated multilayer antireflection coating films for nonvacuum processed crystalline silicon solar cells, *International Journal of Photoenergy*, 2017 (2017).

13. Liu, H., Jiang, Y., Wang, L., Leng, J., Sun, P., Zhuang, K., Ji, Y., Cheng, X., Jiao, H. ve Wang, Z., Correlation between properties of HfO<sub>2</sub> films and preparing parameters by ion beam sputtering deposition, *Applied optics*, 53,4 (2014) A405-A411.
14. Martínez-Merlín, I., Guzman-Mendoza, J., García-Hipólito, M., Sánchez-Resendiz, V., Lartundo-Rojas, L., Fragoso, R. ve Falcony, C., Transparent and low surface roughness HfO<sub>2</sub>: Tb<sup>3+</sup>, Eu<sup>3+</sup> luminescent thin films deposited by USP technique, *Ceramics International*, 42,2 (2016) 2446-2455.
15. Bright, T.J., Watjen, J.I., Zhang, Z., Muratore, C. ve Voevodin, A.A., Optical properties of HfO<sub>2</sub> thin films deposited by magnetron sputtering: From the visible to the far-infrared, *Thin Solid Films*, 520,22 (2012) 6793-6802.
16. Jayavel, M., Ramalakshmi, N. ve Antony, S.A., Synthesis, Characterization and Cytocompatibility of HfO<sub>2</sub> Nanoparticle Against A549 Cell Lines with Potent Antimicrobial Activities, *Journal of Nanoscience and Technology*, (2017) 245-248.
17. García-Saucedo, C., Field, J.A., Otero-Gonzalez, L. ve Sierra-Álvarez, R., Low toxicity of HfO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub> nanoparticles to the yeast, *Saccharomyces cerevisiae*, *Journal of hazardous materials*, 192,3 (2011) 1572-1579.
18. Al-Kuhaili, M., Durrani, S., Bakhtiari, I., Dastageer, M. ve Mekki, M., Influence of hydrogen annealing on the properties of hafnium oxide thin films, *Materials Chemistry and Physics*, 126,3 (2011) 515-523.
19. Du, Q., Wang, W., Li, S., Zhang, D. ve Zheng, W., Effects of substrate temperature on the structural, optical and resistive switching properties of HfO<sub>2</sub> films, *Thin Solid Films*, 608 (2016) 21-25.
20. Wang, Y., Lin, Z., Cheng, X., Xiao, H., Zhang, F. ve Zou, S., Study of HfO<sub>2</sub> thin films prepared by electron beam evaporation, *Applied Surface Science*, 228,1-4 (2004) 93-99.
21. Khan, S.B., Zhang, Z. ve Lee, S.L., Annealing influence on optical performance of HfO<sub>2</sub> thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 816 (2020) 152552.
22. 2050, I.E.O.w.p.t., *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*, (2019).
23. Green, M.A., Photovoltaic principles, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14,1-2 (2002) 11-17.
24. Goetzberger, A., Luther, J. ve Willeke, G., Solar cells: past, present, future, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 74,1-4 (2002) 1-11.
25. Adams, W.G. ve Day, R.E., V. The action of light on selenium, *Proceedings of the Royal Society of London*, 25,171-178 (1877) 113-117.



26. Nelson, J., The physics of solar cells, World Scientific Publishing Company, 2003.
27. Battaglia, C., Cuevas, A. ve De Wolf, S., High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives, *Energy & Environmental Science*, 9,5 (2016) 1552-1576.
28. Radziemska, E., Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29,5 (2003) 407-424.
29. Wang, H., Wang, A., Yang, H. ve Huang, J., Study on the thermal stress distribution of crystalline silicon solar cells in BIPV, *Energy Procedia*, 88 (2016) 429-435.
30. ÖZTÜRK, H.H., Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, 2017.
31. Shikder, M.A.A., Advance Temperature Modeling of Solar PV, Concordia University, 2011.
32. Sinton, R.A. ve Cuevas, A., Contactless determination of current-voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data, *Applied Physics Letters*, 69,17 (1996) 2510-2512.
33. Gatz, S., Dullweber, T. ve Brendel, R., Evaluation of series resistance losses in screen-printed solar cells with local rear contacts, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1,1 (2011) 37-42.
34. Dhariwal, S., Mittal, S. ve Mathur, R., Theory for voltage dependent series resistance in silicon solar cells, *Solid-state electronics*, 27,3 (1984) 267-273.
35. Şenay, G., Çok Eklemlı Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli İle Verim Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ..., Ankara, 2011.
36. Mandong, A.-M., Design and simulation of single, double, and multi-layer antireflection coating for crystalline silicon solar cell, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.
37. Mack, I., Stuckelberger, J., Wyss, P., Nogay, G., Jeangros, Q., Horzel, J., Allebé, C., Despeisse, M., Haug, F.-J. ve Ingenito, A., Properties of mixed phase silicon-oxide-based passivating contacts for silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 181 (2018) 9-14.
38. Oates, A. ve Reehal, H., Effect of diffusion parameters on emitter formation in silicon solar cells by proximity rapid thermal diffusion, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 77 (2018) 83-87.
39. Sharma, R., Amit, G. ve Ajit, V., Effect of single and double layer antireflection coating to enhance photovoltaic efficiency of silicon solar, (2017).

40. Sikder, U. ve Zaman, M.A., Optimization of multilayer antireflection coating for photovoltaic applications, *Optics & Laser Technology*, 79 (2016) 88-94.
41. Trezza, T. ve Krochta, J., Specular reflection, gloss, roughness and surface heterogeneity of biopolymer coatings, *Journal of applied polymer science*, 79,12 (2001) 2221-2229.
42. Kovalenko, S., Descartes-Snell law of refraction with absorption, *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, (2001).
43. <https://www.physicsclassroom.com/class/refln/Lesson-1/Specular-vs-Diffuse-Reflection> Specular-vs-Diffuse-Reflection. 03.11.2020.
44. <http://sinovoltaics.com/learningcenter/solarcells/anti-reflective-coatingfor-solar-panels>, Anti Reflective Coating: usage for solar panels. 04.03.2018.
45. <http://www.pveducation.org/pvcdrom/anti-reflection-coatings>, Anti-Reflection Coatings,. 05.06.2018.
46. Swatowska, B., Stapinski, T., Drabczyk, K. ve Panek, P., The role of antireflective coatings in silicon solar cells—the influence on their electrical parameters, *Optica Applicata*, 41,2 (2011) 487-492.
47. Medhat, M., El-Zaiat, E.-S., Farag, S., Youssef, G. ve Alkhadry, R., Enhancing silicon solar cell efficiency with double layer antireflection coating, *Turkish Journal of Physics*, 40,1 (2016) 30-39.
48. Ni, J., Zhu, Y., Wang, S., Li, Z., Zhang, Z. ve Wei, B., Nanostructuring HfO<sub>2</sub> thin films as antireflection coatings, *Journal of the American Ceramic Society*, 92,12 (2009) 3077-3080.
49. Rancourt, J.D., *Optical thin films: user handbook*, SPIE Press, 1996.
50. Macleod, H.A., *Thin-film optical filters*, CRC press, 2017.
51. Ko, J., Gong, D., Pillai, K., Lee, K.-S., Ju, M., Choi, P., Kim, K.-R., Yi, J. ve Choi, B., Double layer SiN<sub>x</sub>: H films for passivation and anti-reflection coating of c-Si solar cells, *Thin Solid Films*, 519,20 (2011) 6887-6891.
52. Üçer, B., design and production of antireflection coating for Ge, ZnSe and ZnS in 8-12 micrometer wavelength region, *The Middle East Technical University*, (2009).
53. Lvovsky, A.I., *Encyclopedia of Optical and Photonic Engineering (Print)-Five Volume Set*, Fresnel equations, CRC Press, 1-6, 2015.
54. Hecht, E., *Optics-Addison*. (2002).
55. Doyle, W.T., Graphical approach to Fresnel's equations for reflection and refraction of light, *American Journal of Physics*, 48,8 (1980) 643-647.

56. Abdullah, K., Germanyum tek kristal optik pencere üzerine yansıma önleyici ince film geliştirilmesi / The development of anti-reflection thin film on germanium single crystal optical window, Gazi Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
57. Zhan, T., Shi, X., Dai, Y., Liu, X. ve Zi, J., Transfer matrix method for optics in graphene layers, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25,21 (2013) 215301.
58. Khorasani, S. ve Rashidian, B., Modified transfer matrix method for conducting interfaces, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 4,3 (2002) 251.
59. Troparevsky, M.C., Sabau, A.S., Lupini, A.R. ve Zhang, Z., Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: from coherent to incoherent interference, *Optics express*, 18,24 (2010) 24715-24721.
60. Steed, R.J., Transfer matrix theory for a type of uniaxial layers: Starting from basic electromagnetism. (2013).
61. Goudon, T., Miljanović, V. ve Schmeiser, C., On the Shockley–Read–Hall model: generation-recombination in semiconductors, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 67,4 (2007) 1183-1201.
62. Fonash, S., *Solar Cell Device Physics* 2nd edn (New York: Academic). (2010).
63. Brendel, R. ve Cells, T.-F.C.S.S., *Physics and Technology*, Wiley-VCH, 227 (2003) 1580-1583.
64. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/types-of-recombination>, Types of Recombination. 25.08.2020
65. Haug, A., Band-to-band Auger recombination in semiconductors, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 49,6 (1988) 599-605.
66. Richter, A., Glunz, S.W., Werner, F., Schmidt, J. ve Cuevas, A., Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon, *Physical review B*, 86,16 (2012) 165202.
67. Fonash, S.J., *Material Properties and Device Physics Basic to Photovoltaics*. In, *Solar Cell Device Physics*, (2010) 9-65.
68. Shockley, W. ve Read Jr, W., Statistics of the recombinations of holes and electrons, *Physical review*, 87,5 (1952) 835.
69. Cosme, I., Cariou, R., Chen, W., Foldyna, M., Boukhicha, R., i Cabarrocas, P.R., Lee, K., Trompoukis, C. ve Depauw, V., Lifetime assessment in crystalline silicon: From nanopatterned wafer to ultra-thin crystalline films for solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 135 (2015) 93-98.
70. Martin, I., Vetter, M., Orpella, A., Puigdollers, J., Cuevas, A. ve Alcubilla, R., Surface passivation of p-type crystalline Si by plasma enhanced chemical vapor

- deposited amorphous SiC x: H films, *Applied Physics Letters*, 79,14 (2001) 2199-2201.
71. Hoex, B., Heil, S., Langereis, E., Van de Sanden, M. ve Kessels, W., Ultralow surface recombination of c-Si substrates passivated by plasma-assisted atomic layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Applied Physics Letters*, 89,4 (2006) 042112.
  72. Black, L.E., *New perspectives on surface passivation: Understanding the Si-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interface*, Springer, 2016.
  73. Ali, H., *Study of Surface Passivation Behavior of Crystalline Silicon Solar Cells*, (2017).
  74. Balaji, N., Hussain, S.Q., Park, C., Raja, J., Yi, J. ve Jeyakumar, R., Surface passivation schemes for high-efficiency c-Si solar cells-A review, *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 16,5 (2015) 227-233.
  75. Rein, S., *Lifetime spectroscopy: a method of defect characterization in silicon for photovoltaic applications*, 85, Springer Science & Business Media, 2006.
  76. Cuevas, A., Wan, Y., Yan, D., Samundsett, C., Allen, T., Zhang, X., Cui, J. ve Bullock, J., Carrier population control and surface passivation in solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 184 (2018) 38-47.
  77. Grant, N.E. ve Murphy, J.D., Temporary surface passivation for characterisation of bulk defects in silicon: a review, *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 11,11 (2017) 1700243.
  78. Lauinger, T., Schmidt, J., Aberle, A.G. ve Hezel, R., Record low surface recombination velocities on 1 Ω cm p-silicon using remote plasma silicon nitride passivation, *Applied Physics Letters*, 68,9 (1996) 1232-1234.
  79. Fossum, J.G., Physical operation of back-surface-field silicon solar cells, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 24,4 (1977) 322-325.
  80. Tobbeche, S. ve Kateb, M.N., Simulation and Optimization of Silicon Solar Cell Back Surface Field, *Materials Science*, 21,4 (2015) 491-496.
  81. Riegel, S., Gloger, S., Raabe, B. ve Hahn, G., Comparison of the passivation quality of boron and aluminum BSF for wafers of varying thickness, *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference 2009*: 1596-1599.
  82. Szlufcik, J., Sivonthaman, S., Nlis, J., Mertens, R.P. ve Van Overstraeten, R., Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells, *Proceedings of the IEEE*, 85,5 (1997) 711-730.
  83. Caballero, L.J., Contact definition in industrial silicon solar cells, *Solar Energy*, (2010) 375-398.

84. Huster, F., Aluminum-back surface field: bow investigation and elimination, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona 2005: 635-638.
85. Murray, J. ve McAlister, A., The Al-Si (aluminum-silicon) system, Bulletin of alloy phase diagrams, 5,1 (1984) 74.
86. Kaminski, A., Vandelle, B., Fave, A., Boyeaux, J., Monna, R., Sarti, D. ve Laugier, A., Aluminium BSF in silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 72,1-4 (2002) 373-379.
87. Bornside, D., Macosko, C. ve Scriven, L., MODELING OF SPIN COATING, Journal of imaging technology, 13,4 (1987) 122-130.
88. Dislich, H. ve Hussmann, E., Amorphous and crystalline dip coatings obtained from organometallic solutions: procedures, chemical processes and products, Thin Solid Films, 77,1-3 (1981) 129-140.
89. Aydoğan, Ş., Katıhal fiziği, Nobel Akademik Yayıncılık, 2014.
90. ERBİLEN, E., Mn katkılı CdS nanoparçacıklarının sentezi ve karakterizasyonu / Synthesis and characterization of Mn doped CdS nanoparticles, Gazi Üniversitesi, 2010.
91. Khan, S.A., Khan, S.B., Khan, L.U., Farooq, A., Akhtar, K. ve Asiri, A.M., Handbook of Materials Characterization, Fourier transform infrared spectroscopy: fundamentals and application in functional groups and nanomaterials characterization, Springer, 317-344, 2018.
92. Berthomieu, C. ve Hienerwadel, R., Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, Photosynthesis research, 101,2 (2009) 157-170.
93. Nærland, T.U., Characterization of light induced degradation in crystalline silicon, (2013).
94. Rahman, M.M. ve Uday, A.B., Investigation of surface passivation schemes for p-type monocrystalline silicon solar cell, Applied Physics A, 122,10 (2016) 1-11.
95. Kökbudak, G., Contact resistivity analysis of different passivation layers via transmission line method measurements, 2017.
96. Orhan, E., Optimization of fabrication steps for n-type c-Si solar cells, 2019.
97. Vinod, A., Rathore, M.S. ve Rao, N.S., Effects of annealing on quality and stoichiometry of HfO<sub>2</sub> thin films grown by RF magnetron sputtering, Vacuum, 155 (2018) 339-344.
98. Ramadoss, A., Krishnamoorthy, K. ve Kim, S.J., Resistive switching behaviors of HfO<sub>2</sub> thin films by sol-gel spin coating for nonvolatile memory applications, Applied Physics Express, 5,8 (2012) 085803.

99. Ye, Q., Liu, P., Tang, Z. ve Zhai, L., Hydrophilic properties of nano-TiO<sub>2</sub> thin films deposited by RF magnetron sputtering, *Vacuum*, 81,5 (2007) 627-631.
100. Durrani, S., CO-sensing properties of hafnium oxide thin films prepared by electron beam evaporation, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 120,2 (2007) 700-705.
101. Hu, H., Zhu, C., Lu, Y.F., Wu, Y., Liew, T., Li, M., Cho, B.J., Choi, W. ve Yakovlev, N., Physical and electrical characterization of HfO<sub>2</sub> metal–insulator–metal capacitors for Si analog circuit applications, *Journal of applied physics*, 94,1 (2003) 551-557.
102. Kumar, M., Jeong, H. ve Lee, D., Effect of UV/ozone plasma treatment on sol–gel-derived HfO<sub>2</sub> thin films, *Ceramics International*, 43,1 (2017) 1174-1179.
103. Xia, J., Chung, T.-S., Li, P., Horn, N.R. ve Paul, D., Aging and carbon dioxide plasticization of thin polyetherimide films, *Polymer*, 53,10 (2012) 2099-2108.
104. Jena, S., Tokas, R., Thakur, S. ve Udupa, D., Study of aging effects on optical properties and residual stress of HfO<sub>2</sub> thin film, *Optik*, 185 (2019) 71-81.
105. Zamharir, S.G., Karimzadeh, R. ve Aboutalebi, S.H., Laser-assisted tunable optical nonlinearity in liquid-phase exfoliated MoS<sub>2</sub> dispersion, *Applied Physics A*, 124,10 (2018) 692.
106. Connolly, J., *Diffraction Basics, Part 2, Introduction to X-Ray Powder Diffraction*, (2012).
107. Kanmaz, İ. ve Abdullah, Ü., Silicon dioxide thin films prepared by spin coating for the application of solar cells, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5,1 (2021) 14-18.
108. Sinton, R.A., Cuevas, A. ve Stuckings, M., Quasi-steady-state photoconductance, a new method for solar cell material and device characterization, *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996* 1996: 457-460.
109. Luque, A. ve Hegedus, S., *Photovoltaic science and engineering*, Wiley Online Library, 2003.
110. Silard, A.P. ve Duță, M.J., Majority-carrier diffusion coefficients in degenerately doped silicon, *Journal of applied physics*, 62,9 (1987) 3809-3812.
111. Zhang, X.-Y., Hsu, C.-H., Lien, S.-Y., Chen, S.-Y., Huang, W., Yang, C.-H., Kung, C.-Y., Zhu, W.-Z., Xiong, F.-B. ve Meng, X.-G., Surface passivation of silicon using hfo<sub>2</sub> thin films deposited by remote plasma atomic layer deposition system, *Nanoscale research letters*, 12,1 (2017) 1-7.
112. Aygün Özyüzer, G. ve Yıldız, İ., Interfacial and structural properties of sputtered HfO<sub>2</sub> layers, (2009).

113. Zhang, X.-Y., Hsu, C.-H., Cho, Y.-S., Lien, S.-Y., Zhu, W.-Z., Chen, S.-Y., Huang, W., Xie, L.-G., Chen, L.-D. ve Zou, X.-Y., Simulation and fabrication of HfO<sub>2</sub> thin films passivating si from a numerical computer and remote plasma ALD, *Applied Sciences*, 7,12 (2017) 1244.
114. Oh, T. ve Choi, C.K., Comparison between SiOC thin films fabricated by using plasma enhance chemical vapor deposition and SiO<sub>2</sub> thin films by using fourier transform infrared spectroscopy, *J. Korean Phys. Soc*, 56,4 (2010) 1150-1155.
115. Toledano-Luque, M., Martinez, F., San Andres, E., Del Prado, A., Martil, I., González-Díaz, G., Bohne, W., Röhrich, J. ve Strub, E., Physical properties of high pressure reactively sputtered hafnium oxide, *Vacuum*, 82,12 (2008) 1391-1394.
116. Tomida, K., Shimizu, H., Kita, K., Kyuno, K. ve Toriumi, A., Infrared Absorption Study of HfO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub>/Si Interface Ranging from 200cm<sup>-1</sup> to 2000cm<sup>-1</sup>, *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 811 (2004).
117. Lee, T., Ahn, J., Oh, J., Kim, Y., Kim, Y.-B., Choi, D.-K. ve Jung, J., Characterization of Ultra-Thin HfO<sub>2</sub> Gate Oxide Prepared by Using Atomic Layer Deposition, *JOURNAL-KOREAN PHYSICAL SOCIETY*, 42 (2003) 272-275
118. Chaubey, G.S., Yao, Y., Makongo, J.P., Sahoo, P., Misra, D., Poudeu, P.F. ve Wiley, J.B., Microstructural and thermal investigations of HfO<sub>2</sub> nanoparticles, *RSC advances*, 2,24 (2012) 9207-9213.
119. Kondaiah, P., Shaik, H. ve Rao, G.M., Studies on RF magnetron sputtered HfO<sub>2</sub> thin films for microelectronic applications, *Electronic Materials Letters*, 11,4 (2015) 592-600.
120. Aldrigo, M., Dragoman, M., Iordanescu, S., Nastase, F., Vulpe, S., Dinescu, A. ve Vasilache, D., Low-voltage permittivity control of coplanar lines based on hafnium oxide ferroelectrics grown on silicon, *IEEE Access*, 7 (2019) 136686-136693.
121. Singh, R., Panigrahi, J. ve Singh, P., Plasma assisted atomic layer deposited hafnium oxide films for silicon surface passivation, *RSC advances*, 6,100 (2016) 97720-97727.
122. Ushakov, S.V., Navrotsky, A., Yang, Y., Stemmer, S., Kukli, K., Ritala, M., Leskelä, M., Fejes, P., Demkov, A. ve Wang, C., Crystallization in hafnia-and zirconia-based systems, *physica status solidi (b)*, 241,10 (2004) 2268-2278.
123. Maria, J., Wickaksana, D., Parrette, J. ve Kingon, A., Crystallization in SiO<sub>2</sub>-metal oxide alloys, *Journal of materials research*, 17,7 (2002) 1571-1579.
124. Varache, R., Leendertz, C., Gueunier-Farret, M., Haschke, J., Muñoz, D. ve Korte, L., Investigation of selective junctions using a newly developed tunnel current model for solar cell applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141 (2015) 14-23.

125. Cesar, I., Granneman, E., Vermont, P., Khatri, H., Kerp, H., Shaikh, A., Manshanden, P., Mewe, A., Romijn, I. ve Weeber, A., Industrial application of uncapped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and firing-through Al-BSF in open rear passivated solar cells, 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2011: 001405-001410.
126. Eguren, J., Del Alamo, J. ve Luque, A., Optimisation of p+ doping level of n+-p-p+ bifacial bsf solar cells by ion implantation, *Electronics Letters*, 16,16 (1980) 633-634.
127. Barbes, M., Quintana, M., Verdeja, L. ve Gonzalez, R., Microstructures of a pressure die cast Al-8.5% Si-3.5% Cu alloy, *Kovove Mater*, 55 (2017) 89-96.
128. Sharma, A. ve Jung, J.P., Possibility of Al-Si brazing alloys for industrial microjoining applications, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 24,3 (2017) 35-40.
129. Haghshenas, M. ve Jamali, J., Assessment of circumferential cracks in hypereutectic Al-Si clutch housings, *Case studies in engineering failure analysis*, 8 (2017) 11-20.
130. Salman, K.A., Omar, K. ve Hassan, Z., Effective conversion efficiency enhancement of solar cell using ZnO/PS antireflection coating layers, *Solar Energy*, 86,1 (2012) 541-547.
131. Ali, K., Khan, S.A. ve Jafri, M.M., Effect of double layer (SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) anti-reflective coating on silicon solar cells, *Int. J. Electrochem. Sci*, 9,12 (2014) 7865-7874.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İzmir’de tamamladı. 2008-2012 yılları arasında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü lisans programını bitirdi. Aynı zamanda 2010-2013 yılları arasında aynı fakültenin Matematik lisans programını (çift anadal) bitirdi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilimdalı Katıhal Fiziği Bilimdalı’nda 2012 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini 2015 yılında bitirdi. 2016 yılında YÖK 100/2000 öncelikli alanlar doktora programı kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Kaynakları/Teknolojileri Bölümünde doktora başladı. Evli ve bir çocuk babası olan İmran KANMAZ İngilizce bilmektedir.