

**HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİSYUM TABANLI
YANSITMAZ KAPLAMALARIN ÜRETİLMESİ VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**PRODUCTION OF HYDROGENATED AMORPHOUS
SILICON BASED ANTIREFLECTION COATINGS AND
INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES**

OLDOUZ TOFİGH KOUZEHKONANİ

Yrd. Doç. Dr. AKIN BACIOĞLU
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim–Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

OLDOUZ TOFIGH KOUZEHKONANI'nin hazırladığı “**HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİSYUM TABANLI YANSITMAZ KAPLAMALARIN ÜRETİLMESİ VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Necdet BAŞTÜRK

Başkan

.....

Yrd. Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Danışman

.....

Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY

Üye

.....

Prof. Dr. Aynur ERAY

Üye

.....

Doç. Dr. Şule ERGÜN

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof.Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/12/2014

OLDOUZ TOFİGH KOUZEHKONANİ

ÖZET

HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİSYUM TABANLI YANSITMAZ KAPLAMALARIN ÜRETİLMESİ VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Oldouz TOFİGH KOUZEHKONANI

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. AKIN BACIOĞLU

Aralık, 2014, 76 Sayfa

Tek katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ ile çift katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısında yansıtma kaplamalar tasarlanmış ve 13,56 MHz RF-plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ile cam ve tek kristal silisyum alttabanlar üzerine büyütülmüştür. $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ince filmler, 8 sccm CO_2 ve 2 sccm SiH_4 geçirilerek elde edilen gaz karışımının plazması kullanılarak; $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ örnekler ise 8 sccm N_2 ve 2 sccm SiH_4 gaz karışım ile üretilmiştir. Üretilen ince filmlerin 550 nm dalgaboyunda kırma indisleri, $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ için, 1,83 ve $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ için, 2,33 olarak hesaplanmıştır. Film kalınlıklarının, örnek üretim sürelerine bağlı fonksiyonları türetilmiştir. Bu fonksiyonlar kullanılarak yansıtma kaplamaların tasarımında gerekli kalınlıklar için deney süreleri belirlenmiştir.

Tek katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ yansıtma önleyicilerin kaplanmasıyla optik yansıtma, $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ için cam üzerinde 512 nm'de 0,087, silisyum üzerinde 562 nm'de 0,0024 olarak; tek katmanlı $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama ile cam üzerinde 542 nm'de 0,095 ve tek kristal silisyum üzerinde, 520 nm için 0,085 ölçülmüştür. Çift katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma önleyici kaplamanın yansıtma miktarı, cam üzerinde 528 nm'de 0,036 ve silisyum üzerinde 548 nm'de 0,0084 ölçülmüştür.

Yansıtma kaplamaların güneş gözelerine uygulanmasıyla, performans değerlendirmesi de yapılmıştır. Güneş gözelerine, tek katman $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ ve çift katman $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ kaplanmasıyla, tayfsal duyarlılık sırasıyla, 0,32'den 0,39 A/W'a, 0,43'ten 0,47 A/W'a ve 0,37'den 0,41 A/W'a artmıştır. Güneş gözelerinin verimliliği ise, aynı sırayla, 0,005'ten 0,009'a, 0,002'den 0,003'e ve 0,014'ten 0,018'e artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yansıtma önleyici kaplama, ARC, PECVD; SLARC, DLARC

ABSTRACT

PRODUCTION OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON BASED ANTIREFLECTION COATINGS AND INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES

OLDOUZ TOFIGH KOUZEHKONANI

Master of Science, Department of renewable energy

Supervisor: Assist. Prof. Dr. AKIN BACIOGLU

December 2014, 76 pages

$a\text{-SiO}_x\text{:H}$ and $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ single layer and double layer with the structure of $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ and $a\text{-SiN}_x\text{:H}$, anti reflection coatings (SLARC and DLARC) were designed and deposited in a plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) system on single crystalline and glass substrates. $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ and $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ layers were deposited, by using the flow rates 2 sccm of SiH_4 and 8 sccm of CO_2 and 8 sccm N_2 , respectively. Thicknesses of the samples were calibrated as a function of deposition time. By using the calibration functions, the required durations of experiments to design anti reflecting layers were extrapolated.

With the SLARC design of $a\text{-SiO}_x\text{:H}$, optical reflectivity from glass was measured as 0.087 at 512 nm and on crystalline silicon as 0.094 at 542 nm. The reflectivity of $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ on glass was measured as 0.095 at 542 nm and as 0.0085 at 520 nm on silicon. With the DLARC design of $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ structure, the reflectivity was measured as 0.036 at 528 nm on glass and as 0.0084 at 548 nm on silicon.

The designed ARCs were applied on solar cells to evaluate any change in their performances. The spectral responsivities of the cells were calculated to increase from 0.32 to 0.39 A/W, from 0.43 to 0.47 A/W and from 0.37 to 0.41 A/W for SLARCs a-SiO_x:H and a-SiN_x:H and DLARC a-SiO_x:H/a-SiN_x:H, respectively. The efficiencies of the cells were increased from 0.005 to 0.009, from 0.002 to 0.003 and from 0.014 to 0.018, in the same respect.

Keywords: Anti-reflecting coating, ARC, SLARC, DLARC, PECVD.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca, değerli bilgileriyle her zaman yönlendirici, öğretici ve eğitici olan; yüksek lisans öğrenimim boyunca hoşgörüsü, sabrı ve heyecanı ile bana kazandırdığı değerler için her zaman minnettar olacağım değerli hocam, Yrd. Doç. Dr. Akın Bacioğlu'na;

umutlarımı, heyecanlarımı, sevinçlerimi, üzüntülerimi kısacası tüm hayatımı paylaştığım; bugüne gelmemde emeği çok büyük olan, çok sevdiğim, her şeyim anneme ve abilerime;

tez çalışmam süresince, bilgi ve deneyimleri ile bana her zaman yardımcı olan, danışmaktan çekinmediğim sevgili Kemal Rüzgar'a ve Timuçin Eren'e;

mutluluklarımı ve üzüntülerimi paylaşan, beni hiç yalnız bırakmayan, hayatımda oldukları için kendimi çok şanslı hissettiğim sevgili dostlarım, Kemal Rüzgar'a, Sahar shahir Davarpanah'a, Arş. Gör. Meltem Babayiğit'e, Timuçin Eren'e ve Kaan Ergün'e;

En içten teşekkürlerimi ve sevgimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER	4
2.1 Güneş Pillerinde Optik Kayıplar	4
2.2 Yansıtma Kaplamalar	6
2.3 Yansıtma Kaplamaların Teorisi.....	7
2.3.1 Geçirgenlik (T) Ve Yansıma (R).....	13
2.3.2 Çift Katmanlı Yansıtma Kaplamalar	15
2.4 Yansıtma Kaplama Üretiminde İnce Film Büyütme Metodları.....	16
2.4.1 Buhar Fazda Büyütme	16
2.4.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	16
2.4.1.1.1 Isıl Buharlaştırma Yöntemi	16
2.4.1.1.2 Saçtırma Yöntemi	17
2.4.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB).....	19
2.4.1.2.1 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)	19
2.4.2 Sıvı Fazda Büyütme	20
2.4.2.1 Sol-Jel Yöntemi	20
2.5 Yansıtma Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler	21

2.6	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum ($a\text{-Si:H}$)	22
2.6.1	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Alaşımları	23
2.6.1.1	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Oksijen Alaşımları ($a\text{-SiO}_x\text{:H}$)	24
2.6.1.2	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Azot Alaşımı ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$)	26
2.7	Güneş Gözesi.....	27
2.7.1	Fotovoltaik Etki	27
2.8	Akım - Gerilim Eğrisi.....	27
2.8.1	Kısa Devre Akımı.....	28
2.8.2	Açık Devre Gerilim.....	29
2.9	Doluluk Oranı.....	29
2.10	Tayfsal Duyarlılık	30
2.11	Güneş gözesinin Verimi.....	31
2.12	Güneş Simülatörünün Tanımı.....	31
2.13	Optik Geçirgenlik	31
3.	ÖRNEK HAZIRLAMA VE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ.....	34
3.1	PECVD Sistemi	34
3.2	Yansıma Ölçüm Düzeneği.....	35
3.3	Optik Geçirgenlik Deneyi	36
3.4	Akım-Gerilim Ölçümleri.....	37
3.5	Tayfsal Duyarlılık Ölçümleri.....	39
4.	DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	40
4.1	Tek Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar	45
4.2	$a\text{-SiO}_x\text{:H}$ Tek Katmanlı Yansıtma Kaplamaların Üretilmesi.....	47
4.3	$a\text{-SiN}_x\text{:H}$ Tek katmanlı Yansıtma Kaplamaların Üretilmesi	49
4.4	Çift Katman Yansıma Önleyici Kaplamalar	51

5.	AMORF SİLİSYUM GÜNEŞ GÖZELERİ İÇİN YANSIMA ÖNLEYİCİ KAPLAMALAR	56
5.1	Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, α -SiO _x :H İle Tek Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi	56
5.1.1	Kaplama Öncesi Ve Kaplama Sonrasında Tayfsal Duyarlılık Ölçümleri	56
5.1.2	Güneş Gözesinin Yansıtmasının Değişimi	57
5.1.3	Akım-Gerilim Değişimi	58
5.2	Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, α -SiN _x :H İle Tek Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi	59
5.3	Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, α -SiO _x :H/ α -SiN _x :H Yapısında Çift Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi	62
6.	SONUÇLAR	68
	KAYNAKLAR.....	71
	ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Güneş gözesinden yansımalar	4
Şekil 2.2. Kaplanmamış silisyum üzerinden ışığın, %35'i yansır, %25'i geçer ve %40'ı soğrulur	5
Şekil 2.3. 0 ve π rad faz farkı olan iki dalganın üstüste binmesi	7
Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin yüzeyine, kırma indisi n_1 ve kalınlığı d_1 olan yansıma önleyici kaplama yapılması	7
Şekil 2.5. Tek katmanlı bir ince filmde ışının yansıma ve kırınımı [2]	9
Şekil 2.6. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi [39,41]	17
Şekil 2.7. Saçtırma cihazının çalışma şeması	18
Şekil 2.8. Saçtırma mekanizması [45]	19
Şekil 2.9. Çift odacıklı PECVD sistemi	20
Şekil 2.10. Sol-jel tekniği ile ince film kaplanmasının şematik gösterimi [48]	21
Şekil 2.11. Kristal silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapıları	22
Şekil 2.12. SiO ₂ yapısı	24
Şekil 2.13. Kristal silisyum, amorf silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot yapısı	26
Şekil 2.14. (a) Karanlıkta olan güneş gözesinin elektriksel özelliğini, (b) ve (c) Güneş gözesinin aydınlatma altında güç üretmesini ve güç ürettiği zaman I-V eğrisinin kaymasını ve (d) ise güneş gözesinin ürettiği güç genellikle 1.çeyreğe taşınır.	28
şekil 2.15. Güneş gözesinden elde edilen akım-gerilim eğrisi (mavi) ve güç-gerilim eğrisi (kırmızı).....	30
Şekil 2.16. Bir a-Si:H filmin optik geçirgenlik spektrumu.....	32
Şekil 3.1. PECVD sistemi	35
Şekil 3.2.Yansıma ölçüm düzeneği şeması	36
Şekil 3.3. Optik geçirgenlik ölçüm düzeneği şeması.....	37

Şekil 3.4. Aydınlatma altında IV ölçümlerinde kullanılan güneş benzetimleyicisi..	38
Şekil 3.5. I-V ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.	38
Şekil 4.1. a-SiO _x :H farklı zamanlarda geçirgenlik miktarı	42
Şekil 4.2. a-SiN _x :H farklı zamanlarda geçirgenlik miktarı.....	43
Şekil 4.3. a-SiO _x :H ve a-SiN _x :H örneklerinin kalınlıklarının deney süresi ile değişimi	44
Şekil 4.4. a-SiO _x :H ve a-SiN _x :H örneklerin kırma indisinin dalgaboyuna bağlılığı.	45
Şekil 4.5. Cam üzerinde tek katmanlı yansıma önleyici kaplama	46
Şekil 4.6. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı yansıma önleyici kaplama	47
Şekil 4.7. Farklı zamanlarda cam üzerinde a-SiO _x :H kaplamanın yüzeyinden yansıma miktarı	48
Şekil 4.8. a-SiO _x :H yansıma önleyici kaplamasının, kristal silisyum üzerine farklı zamanlarda yansıması	49
Şekil 4.9. Farklı zamanlarda cam üzerinde kaplanmış a-SiN _x :H kaplamanın	50
Şekil 4.10. a-SiN _x :H yansıma önleyici kaplamasının, kristal silisyum üzerine farklı zamanlarda yansıma miktarı	51
Şekil 4.11. Cam üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama	52
Şekil 4.12. Kristal silisyum üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama	53
Şekil 4.13. Cam üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama	54
Şekil 4.14. Kristal silisyum üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama	55
Şekil 5.1. Tek katman a-SiO _x :H yansıtmaz kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için tayfsal duyarlılığın, dalgaboyuna bağlı değişimi..	57
Şekil 5.2. Tek katman a-SiO _x :H yansıtmaz kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için yansıtmanın dalgaboyuna bağlı değişimi.....	58
Şekil 5.3. Tek katman a-SiO _x :H yansıtmaz kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri.	59
Şekil 5.4. Tek katman a-SiN _x :H yansıtmaz kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için yansıtmanın dalgaboyuna bağlı değişimi.....	60

Şekil 5.5. Tek katman $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için tayfsal duyarlılığın, dalga boyuna bağlı değişimi..	61
Şekil 5.6. Tek katman $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri.	62
Şekil 5.7. $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası yansımaya spektrumları.	63
Şekil 5.8. $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası tayfsal duyarlılığı.	64
Şekil 5.9. $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri...	65
Şekil 5.10. Güneş gözesi üzerinde tek katmanlı (a) 550 nm için tam yansıtıcı ve (b) 550 nm için yansımaya önleyici kaplamalar.	66
Şekil 5.11. Güneş gözesi üzerinde çift katmanlı yansımaya önleyici kaplama	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. İnce film büyütme teknikleri	16
Çizelge 4.1. Örnek büyütme koşulları.....	41
Çizelge 4.2. Farklı sürelerde üretilmiş a-SiO _x :H örneklerin özellikleri.....	42
Çizelge 4.3. Farklı sürelerde üretilmiş a-SiN _x :H örneklerin özellikleri.....	43
Çizelge 4.4. Cam üzerinde tek katmanlı a-SiO _x :H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgalarda yansıma miktarı	48
Çizelge 4.5. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı a-SiO _x :H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgalarda yansıma miktarı.....	49
Çizelge 4.6. Cam üzerinde tek katmanlı a-SiN _x :H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgalarda yansıma miktarı	50
Çizelge 4.7. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı a-SiN _x :H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgalarda yansıma miktarı.....	51
Çizelge 4.8. 528 nm de cam üzerinden, çift katmanlı yansıma önleyici kaplama .	54
Çizelge 4.9. 548nm de kristal silisyum üzerinde, çift katmanlı yansıma önleyici kaplama.....	55
Çizelge 5.1. Kaplanmış ve kaplanmamış güneş gözesi üzerinde kısa devre akımı, açık devre voltajı, doluluk oranı ve verimin değişimi.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Γ	Yüzey yansımaya katsayısı
n	Kırma indisi
R	Yansımaya miktarı
d	Kaplama kalınlığı
E	Elektrik alan
B	Manyetik alan
t	Zaman
T	Geçirgenlik
ϵ_0	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ρ	Uzaysal yük yoğunluğu
J	Akım yoğunluğu
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
r	Yansımaya katsayısı
c	Işık hızı
v	Madde ortamındaki ışık hızı
Δ	Optik yol uzunluğu
δ	Faz farkı
M	Transfer matrisi
t	Geçirgenlik katsayısı
λ	Dalgaboyu
I_L	Güneş gözesinin ürettiği akım
I_D	Diyot üzerinden geçen akım
q	Elektron yükü
k	Boltzman sabiti
T	Mutlak sıcaklık
J_{SC}	Kısa devre akım yoğunluğu
I_0	Sıcaklığa bağlı olarak değişen karanlık doyum akımı
G	Elektron boşluk üretim hızı
L_n, L_p	Azınlık taşıyıcı difüzyon uzaklığı
V_{OC}	Açık devre voltajı
η	Güneş gözesi verimi

FF	Doluluk oranı
I_{SC}	Kısa devre akımı
SR	Tayfsal duyarlılık
QE	Kuantum verimliliği
P_0	Güneş gözesinin üzerine düşen optik güçtür
α	Soğurma katsayısı
E_g^{Tauc}	Tauc bant aralığı
E_g^{Cody}	Cody bant aralığı
$f[]$	Akış hızı
k	Dalgasayısı

Kısatmalar

ARC	Yansıma önleyici kaplamalar
SLARC	Tek katmanlı yansıma önleyici kaplamalar (Single layer anti reflection coating)
DLARC	Çift katmanlı yansıma önleyici kaplamalar (Double layer anti reflection coating)
a-SiO _x :H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum oksijen alaşımları
a-SiN _x :H	Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot alaşımları
RF	Radyo frekansı
PVD	Fiziksel buhar biriktirme (Physical vapor deposition)
CVD	Kimyasal buhar biriktirme (Chemical vapor deposition)
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (Plasma enhanced chemical vapour deposition)

1. GİRİŞ

Dünyadaki fosil yakıtların tükenecek olması, alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Fosil yakıtların neden olduğu, başta sera etkisi olmak üzere çevresel problemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının bir konu popüler olmasını sağlamıştır. Yerkürenin temel enerji kaynağı olması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok kullanım alanı bulan güneş enerjisidir. Güneş enerjisinden yararlanılmasında, gelen enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek önemli bir araştırma konusudur. Güneş-elektrik dönüşümlerinde, temelinde yarıiletken teknolojisi olan güneş gözeleri kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişimiyle beraber, başta tek ya da multi kristallerden üretilen birinci nesil güneş gözeleri, yüksek soğurma katsayısına sahip malzemelerin ince film olarak üretilmesi ile genellikle saydam alttabanlar üzerine üretilen ikinci nesil güneş gözeleri orataya çıkmıştır. Yüksek dönüşüm verimlerine karşılık maliyetleri de yüksek olan birinci nesil güneş gözelerine alternatif olarak sunulan ikinci nesil güneş gözeleri maliyetleri oldukça düşük olmasına karşın verimleri de çok yüksek değildir. Bir gelecek vizyonu olarak öngörülen üçüncü nesil güneş gözeleri, yüksek verimli olmalarına karşın düşük maliyetle üretilen malzemeler ya da yeni tasarımları konu alır.

Hangi nesil güneş gözesi olursa olsun, performanslarının artırılması konusunda yapılan çalışmalar da oldukça fazladır. En önemli araştırmalardan birisi güneş gözelerinin optik tasarımıdır. Güneş spektrumunun önemli bir kısmı güneş gözesinin ön yüzeyinden yansır ya da hiç soğurulmadan geçer. Bu nedenle, göze performansının artırılmasında, güneşten gelen ışığın mercekler yardımı ile konsantrasyonunun artırılması olduğu kadar, ön yüzeyden yansımaların azaltılması ve ışığın güneş gözesi içinde aldığı optik yolun uzatılması (ışık tuzaklama) çalışmaları da önemli yer bulmaktadır [1]. Soğurulan optik güç yoğunluğunun artması ile üretilen elektron boşluk çiftlerinin sayısı, dolayısıyla gözenin ürettiği akım da artar. Böylece gelen optik güç başına gözenin ürettiği güç de artar.

Yansıtma kaplamaların üretilmesi ince film teknolojisinin gelişmesi gerekti. Modern anlamdaki ince film optiğine ilk katkılar Robert Boyle ve Robert Hooke'un

alışmaları ile olmuştur [2]. Newton halkaları olarak bilinen olguyu bağımsız olarak açıklamışlardır. Ayrıca, Hooke yaptığı çalışmalarda ince saydam tabakalarda ışığın davranışını incelemiş, tabakanın kalınlığının ışığın rengi üzerindeki etkisi olduğunu gözlemlemiştir [2]. Daha sonra 19.yy'da Thomas Young'ın çift yarık deneyi [3], ışığın dalga özelliği sergileyebileceğini gösterir. ışığın dalga doğası ışık dalgalarının iki yarıktan da geçerek girişim yapmasını ve ekranda aydınlık ile karanlık bantlar oluşturmasını sağlar [4], [5]. 1816'da Fresnel, Young'ın girişim prensibi ile Huygens'in ışığın yayılma doğrultusu fikrini bir araya getirerek, çok zarif bir kırınım yasası ortaya çıkarmıştır. Tüm bu gelişmelerin yanı sıra, 1817'de güneş tayfları üzerinde çalışma yapan Joseph Fraunhofer da ilk defa yansıtma kaplama yapmıştır [6]. 19.yy sonlarında James Clerk Maxwell elektrik ve manyetik alanların uzayda dalga formunda sabit ışık hızında ilerlediğini bularak basitçe ince film teorisinin şekillenmesine de sebep olmuştur [7]. 1930'ların ortalarında, vakum buharlaştırma teknikleri kullanılarak ilk defa yansıtma kaplama yapılmıştır [8].

Tek ya da multi kristal silisyum güneş gözelerinde, kırma indisi küçük olan silisyumdioksit, titanyumoksit, silisyumnitrr vb. (SiO_2 , TiO_2 , Si_3N_4) malzemeler, yansıma önleyici kaplama olarak kullanılır [9-15]. SiO_2 ve Si_3N_4 ile üretilen yansıma önleyici kaplamalar, aynı zamanda n yüzey yeniden birleşme hızını azaltacağı için yüzey pasivasyonuna katkı verir. Bu nedenle sıklıkla tercih edilir. Cam zerine üretilmiş güneş pillerinde, yansıtma kaplamanın yapılacağı yüzey cam-hava arayüzeyi olacağından, kırma indisi camın kırma indisinden daha küçük olan malzemeler kullanılır. Cam zerine üretilmiş güneş ince film güneş gözelerinde en çok tercih edilen magnezyum florürdür (MgF_2) [16]. Bu tür malzemelerin büyütülmesi için en çok fiziksel buhar biriktirme özellikle radyo frekansı (RF) magnetron saçtırma ve sol-jel yöntemleri kullanılır [17-20], [21-23]. Aynı zamanda birçok kristal silisyum güneş gözesinde, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ile kaplama kullanılmaktadır [24-28].

Bu tez çalışmasında, tek katmanlı (SLARC) ve çift katmanlı (DLARC) hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot ($\alpha\text{-SiN}_x\text{:H}$) ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum oksijen ($\alpha\text{-SiO}_x\text{:H}$) alaşım yansıtma kaplamaları cam ve kristal silisyum üzerine tasarlanmış ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme PECVD yöntemiyle yapılmıştır. Bu amaçla, önce farklı deney sürelerinde birer seri α -

$\text{SiO}_x\text{:H}$ ve $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ ince film örnekler hazırlanarak, kullanılan örnek hazırlama parametreleri için, kalınlığın deney süresine bağıllığı matematiksel bir fonksiyonla belirlenmiştir. İstenilen yansıtma kaplama üretimi için gerekli kalınlıklar ve bu kalibrasyon eğrileri kullanılarak, kaplama deney süreleri hesaplanmıştır.

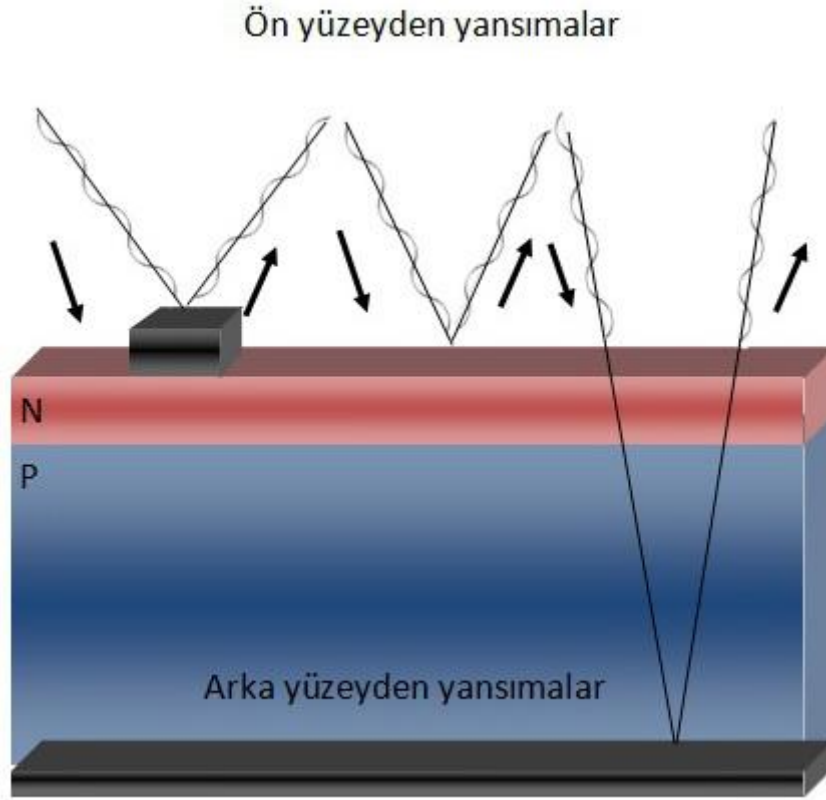
Yansıma önleyici kaplamalar, cam ve kristal silisyum üzerine, tek ve çift katman olarak üretilmiştir. Yansımanın önlenmesi istenilen dalga boyu değiştirilerek bir kaç farklı dalga boyu için kaplama üretilmiş ve yansıtıcılıkları dalga boyuna bağılı olarak ölçülmüştür. Optik yansıma ölçümlerinden istenilen sonuçlar elde edildiğinde, $\text{a-SiO}_x\text{:H}$ ve $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplamaların, güneş gözelerinin performansına olan etkisinin incelenmesi planlanmıştır. Bunun için, bahçe aydınlatmasında kullanılan lambaların üzerinden sökülen, cam üzerine üretilmiş ince film güneş gözeleri yansıtma kaplanarak tayfsal duyarlılık, akım-gerilim ve optik yansıma deneyleri yapılmıştır. Yansıtma kaplamaların tasarımında güneş spektrumunun en yüksek olduğu dalga boyu değil, gözenin en yüksek tayfsal duyarlılık gösterdiği dalga boyu temel alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, PECVD yöntemiyle üretilmiş hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tabanlı ince film güneş gözelerinin üretiminde, vakum hiç kırılmadan, $\text{a-SiO}_x\text{:H}$ ve $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplamaların da yapılabileceği temelinde tartışılmıştır. Böylece bu tür gözelerin üretiminde maliyetin ve toplam üretim zamanının düşürülebileceği yorumu yapılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde, güneş pillerin optik kayıplarının, yansıtma kaplamaların teorilerinin, ince filimlerin büyütme metotlarının, yansıtma kaplama üretiminde kullanılan hidrojenlendirilmiş amorf silisyum alaşımların ($a\text{-SiO}_x\text{:H}$, $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ vb.) ve kullanılan diğer malzemelerin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, güneş pillerinin karakterizasyon metodları da bu bölümde verilmiştir.

2.1 Güneş Pillerinde Optik Kayıplar

Güneş gözesinin ön yüzeyine düşen ışığın, soğurulmadan önce yansıması optik kayıp olarak tanımlanır. Yansıma nedeniyle oluşan optik kayıplar, genel olarak, hava-yaygıç (emitter) ara yüzeyinden ve kontaklardan yansımalar şeklinde gerçekleşir. Giricilik derinliği büyük olan uzun dalgaboylu dalgalar arka kontağa kadar ilerleyip yansıyarak, elektron-boşluk çifti oluşturmada güneş gözesinden çıkarak optik kayba neden olabilirler. Optik kayıpların doğrudan etkisi, güneş gözesinin kısa devre akımının ve dolayısıyla veriminin azalması şeklinde görülür. Şekil 2.1’de güneş gözesinin ön ve arka yüzeylerinden yansımalar verilmiştir.



Şekil 2.1. Güneş gözesinden yansımalar

Optik kayıpları en az miktara indirmek için ışık tuzaklama yöntemleri kullanılır. Işık tuzaklama iki yöntemle yapılabilir. Birincisi ışık yansıma miktarının yansıma önleyici kaplamalar kullanılarak azaltılması ve ikincisi ışığın güneş gözesi içindeki optik yolunu uzatmaktır.

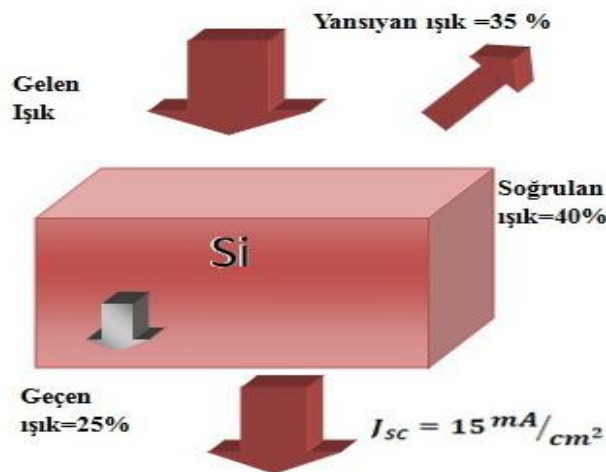
Yansıma önleyici kaplaması olmayan bir tek-kristal silisyum güneş gözesi yüzeyine, ışık yüzey normaline paralel olarak düşürüldüğünde, ön yüzeyden gerçekleşecek yansıma, Fresnel denklemleri ile hesaplanabilir [1].

$$\Gamma_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.1)$$

Burada, Γ_{12} yüzey yansıma katsayısı, n_1 birinci ortam kırma indisi ve n_2 ikinci ortam kırma indisidir. Yansıma miktarını bulmak için alttaki ifadeyi kullanabiliriz;

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.2)$$

Dalgaboyu 900 nm olan monokromatik bir ışık için, yansıma önleyici kaplaması olmayan 5 μm olan kristal silisyum güneş gözesi yüzeyinden yansıma % 35 olarak hesaplanır. 400-1100 nm aralığında yansıma miktarı, saçılma matrisi yöntemiyle hesaplanabilir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi kaplanmamış bir silisyum alttaş üzerinden ışığın, % 35'i yansır, % 25'i geçer ve %40'ı soğurulur ve elde edilen toplam akım yoğunluğu 15 $\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ 'dır [1].

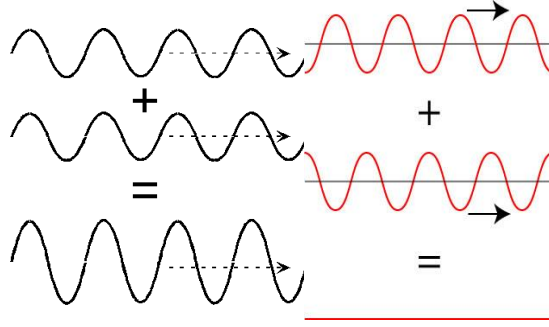


Şekil 2.2. Kaplanmamış silisyum üzerinden ışığın, %35'i yansır, %25'i geçer ve %40'ı soğurulur

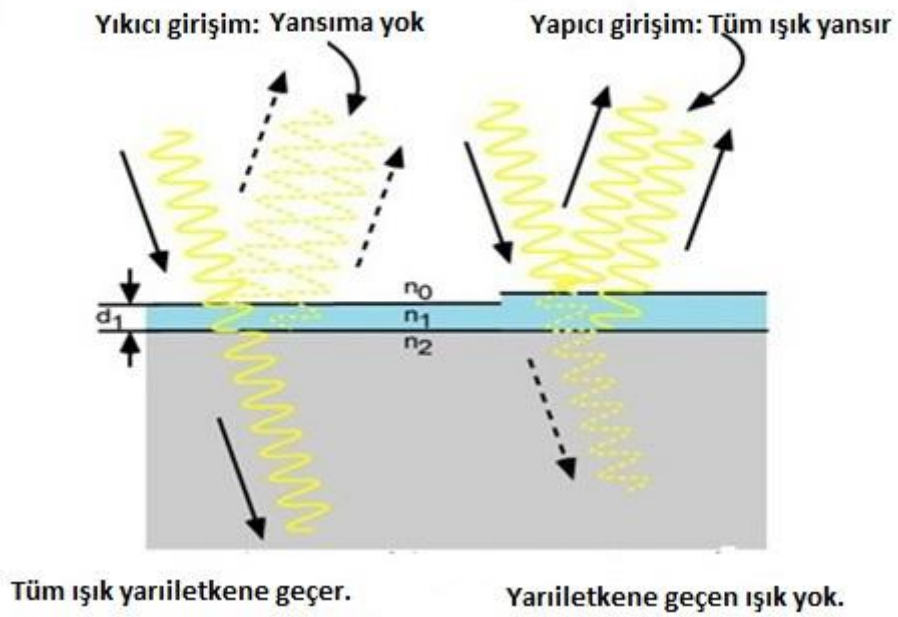
2.2 Yansıtma Kaplamalar

Yansıma önleyici kaplaması olmayan güneş pillerinin üzerine gelen ışığın yaklaşık yüzde 35'u güneş gözesinde hiç etki bırakmadan ön yüzeyden yansır. Bu optik kaybı azaltmak için yansıtma kaplamalar tasarlanmalıdır (Anti reflection coating-ARC) [29,30].

Yansıtma kaplamalar yansımaları azaltmak için bir yüzeye uygulanır ve esas olarak dielektrik malzemeden başka bir şey değildir. Yansıtma kaplama malzemesinin kırma indisi, genel olarak, ışığın geldiği ortamın kırma indisi ile kaplama yapılacak malzemenin kırma indisinin geometrik ortalaması olacak şekilde, kaplama malzemesi seçilir [31,32]. Yansıtma kaplamalar, temelde iki dalgaın üstüste binmesi ile yıkıcı girişim oluşturmaları ilkesi ile tasarlanırlar. Şekil 2.3'te aralarında 0 ve π rad faz farkı olan iki dalgaın üstüste binmesi gösterilmiştir. Yansıtma kaplama yapılmış bir güneş gözesinin yüzeyine ışık düştüğünde, birinci yüzeyden yansıyan ışınlar ile ikinci ortamdan gelen ışınların arasında faz farkı oluşur. Oluşan bu faz farkına göre, ayrı yüzeylerden yansıyan dalgalar arasında yapıcı veya yıkıcı girişim gerçekleşir. Yapıcı girişimde yansıma artarken, yıkıcı girişim yansımanın azalmasına neden olur. Yansıtma kaplamalarda en önemli parametreler kırma indisi ve katman kalınlığıdır [33]. Şekil 2.4'te, yansıtma kaplama olarak çalışması amacıyla atılmış, kırma indisi n_1 olan kaplamanın kalınlığına (d_1) bağlı olarak yansıma özellikleri incelenmiştir. Kaplamanın ön ve arka yüzeylerinden yansıyan dalgalar arasındaki faz farkı, d_1 'e bağlıdır. d_1 çeyrek dalgaboyuna (ya da tek katlarına) eşitse iki dalga arasındaki yol farkı $\lambda/2$ kadar olur. Buna karşılık gelen faz farkı π rad olduğundan yıkıcı girişim oluşur. Yani bu dalgaboyu için hiç yansıma gerçekleşmez. Eğer d_1 dalgaboyunun yarısına (ya da tam katlarına) eşitse iki dalga arasındaki faz farkı 2π rad olacağından yapıcı girişim gerçekleşir.



Şekil 2.3. 0 ve π rad faz farkı olan iki dalga'nın üstüste binmesi



Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin yüzeyine, kırma indisi n_1 ve kalınlığı d_1 olan yansıma önleyici kaplama yapılması

2.3 Yansıtma Kaplamaların Teorisi

Yansıtma kaplamalarda yansıma (R) ve geçirgenlik (T) oranlarının daha iyi algılanabilmesi için Maxwell denklemleri kullanarak dielektrik bir ortamda elektrik ve manyetik alanlar arasında bir bağıntı yazılır [2].

Genel durumda ve boşlukta Maxwell denklemleri aşağıdaki şekildedir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.6)$$

Boşlukta $\rho = 0$ bu yüzden $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ dır.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.8)$$

(2.3), (2.5) ve (2.6) formülleri kullanılarak (2.7) formüllü elde ediliyor.

$$\nabla^2 \cdot \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} \quad (2.10)$$

Eş.2.8'de formülde $\vec{k}$, dalga vektörü, i ise kompleks sayıdır.

Bulunan elektrik alanı Maxwell denkleminde koyarak manyetik alanı elde edebiliriz.

$$\vec{B} = \frac{\vec{E}}{c} \quad (2.11)$$

$$\vec{B} = E \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.12)$$

$$\vec{B} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)} \quad (2.13)$$

Elektrik ve manyetik alan vektörlerinden elektrik ve manyetik alanların büyüklüğü aşağıdaki formül ile verilmiştir.

$$B_0 = \sqrt{\epsilon_0} \sqrt{\mu_0} E_0 \quad (2.14)$$

EM dalganın (ışığın) hızı vakum ortamı için $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ve manyetik alanın büyüklüğü

$B_0 = 1/c E_0$ ile verilir.

Burada $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ boşluğun dielektrik geçirgenliği ve $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ boşluğun manyetik geçirgenliğidir.

Maddesel ortamda elektromanyetik dalganın hızı $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ olduğundan ve madde ortamında manyetik alanın büyüklüğü ise Eş 2.11 ile verilir.

$$B_0 = \frac{1}{v} E_0 \quad (2.15)$$

Elektromanyetik dalganın hızı ortamın kırma indisine bağlıdır.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.16)$$

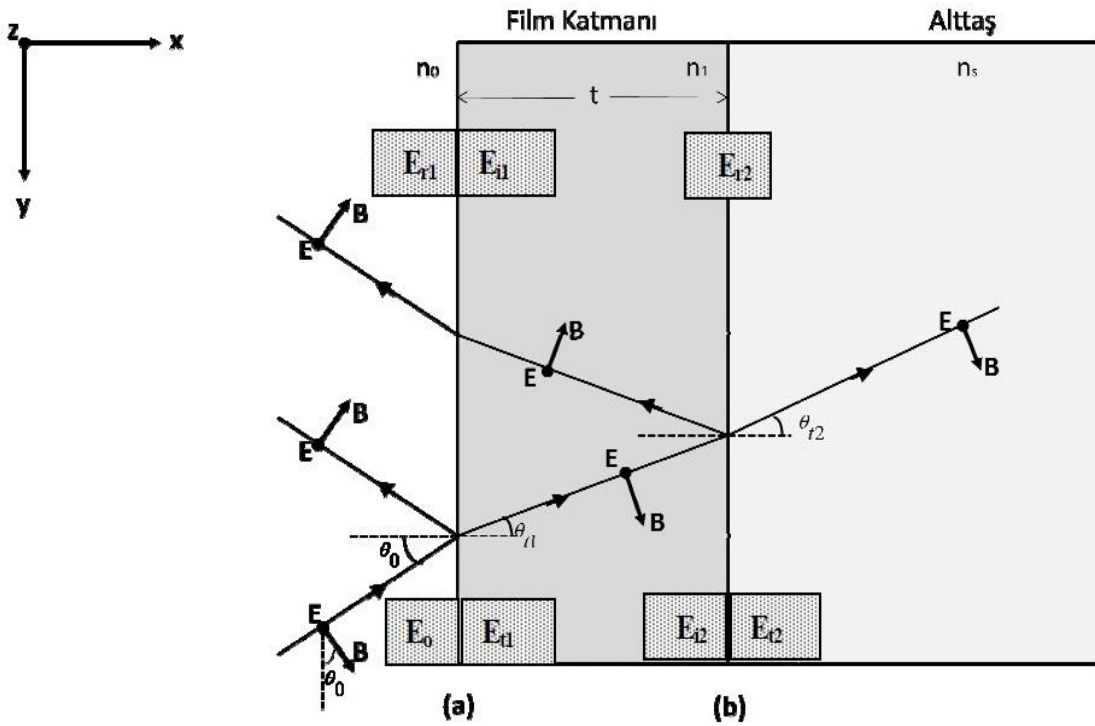
Manyetik alanın büyüklüğü kırma indisi cinsinden yazıldığında,

$$B_0 = \frac{n}{c} E_0 \quad (2.17)$$

$$B_0 = n \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E_0 \quad (2.18)$$

elde edilir.

Bu bağıntı ile geçiş matrislerini bulabiliriz. Şekil 2.5'te kalınlığı t olan bir tek katlı kaplamanın üzerine, θ_0 geliş açısı ile düşen kutuplanmış bir elektromanyetik dalganın uğradığı yansıma ve kırılma davranışı verilmiştir. Gelen dalganın elektrik alan bileşeni, geliş düzlemine dik seçilmiştir [34].



Şekil 2.5. Tek katmanlı bir ince filmde ışının yansıma ve kırılması [2]

Elektromanyetik teoriye göre bir ara yüzey sınırında, gelen dalganın elektrik ve manyetik alan vektörleri, büyüklük bakımından, kırılarak geçen dalgayla yansıyan dalganın toplamı ile elektrik ve manyetik alan vektörleri toplamına eşittir [2]. Havadan gelen ve ince filmde geçerek alttaşa gelen dalganın, elektrik ve

manyetik alanlara ilişkin sınır koşulları kullanılarak, (a) ve (b) arayüzeylerine gelen ışınların genlikleri elde edilir [34]:

$$E_a = E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \quad (2.19)$$

$$E_b = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \quad (2.20)$$

E_{r1} ve E_{r2} , sırasıyla, (a) ve (b) arayüzeylerinden yansımalar, E_{t1} ve E_{t2} ise (a) ve (b) arayüzeyinden kırılmayı ve E_{i1} , (b) arayüzeyinden yansıyıp (a) arayüzeyine ince film içinden gelen; E_{i2} , E_{t1} 'in film katmanını geçip (b) arayüzeyine geldiğindeki genliği vermektedir.

Manyetik alan;

$$B_a = B_0 \cos \theta_0 - B_{r1} \cos \theta_0 = B_{t1} \cos \theta_{t1} - B_{i1} \cos \theta_{t1} \quad (2.21)$$

$$B_b = B_{i2} \cos \theta_{t1} - B_{r2} \cos \theta_{t1} = B_{t2} \cos \theta_{t2} \quad (2.22)$$

olarak yazılır.

Manyetik ve elektrik alan büyüklükleri arasındaki $B_0 = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E_0$ eşitliği kullanılarak manyetik alan tekrar yazılabilir,

$$B_a = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_0 (E_0 - E_{r1}) = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} (E_{t1} - E_{i1}) \quad (2.23)$$

$$B_b = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} (E_{i2} - E_{r2}) = n_s \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t2} E_{t2} \quad (2.24)$$

$$B_a = Y_0 (E_0 - E_{r1}) = Y_1 (E_{t1} - E_{i1}) \quad (2.25)$$

$$B_b = Y_1 (E_{i2} - E_{r2}) = Y_2 E_{t2} \quad (2.26)$$

$$Y_0 = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_0 \quad (2.27)$$

$$Y_1 = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} \quad (2.28)$$

$$Y_s = n_s \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t2} \quad (2.29)$$

E_{i2} ve E_{t1} 'in farklı olmasının nedeni faz farkıdır.

$\Delta_1 = \frac{\Delta}{2} = n_1 t \cos \theta_{t1}$ ve Δ optik yol uzunluğudur. δ faz farkıdır ve

$$\delta = k_0 \Delta_1 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right) n_1 t \cos \theta_{t1} \quad (2.30)$$

şeklinde bulunur.

Böylece,

$$E_{i1}=E_{r2}e^{-i\delta} \quad (2.31)$$

$$E_{i2}=E_{t1}e^{-i\delta} \quad (2.32)$$

E_b ve B_b 'yi çözmek için Eş.2.26 ve 27 formülleri kullanılabilir.

$$E_b=E_{t1}e^{-i\delta}+E_{i1}e^{i\delta}=E_{t2} \quad (2.33)$$

$$B_b=\gamma_1(E_{t1}e^{-i\delta}+E_{i1}e^{i\delta})=E_{t2}\gamma_s E_{t2} \quad (2.34)$$

$E_b=E_{t1}e^{-i\delta}+E_{i1}e^{i\delta}=E_{t2}$ eşitliği (γ_1) ile çarpılıp iki eşitlik taraf tarafa toplanırsa ve $B_b=\gamma_1(E_{t1}e^{-i\delta}+E_{i1}e^{i\delta})=E_{t2}\gamma_s E_{t2}$ eşitliği ($-\gamma_1$) ile çarpılır eşitlikler taraf tarafa toplanırsa E_{t1} ve E_{i1} , E_b ve B_b cinsinden yazılmış olur.

$$E_{t1}=(\frac{\gamma_1 E_b+B_b}{2\gamma_1})e^{i\delta} \quad (2.35)$$

$$E_{i1}=(\frac{\gamma_1 E_b-B_b}{2\gamma_1})e^{-i\delta} \quad (2.36)$$

elde edilen E_{t1} ve E_{i1} eşitlikleri, $2\cos\delta=e^{i\delta}+e^{-i\delta}$ ve $2i\sin\delta=e^{i\delta}-e^{-i\delta}$ temel trigonometrik bağıntıları ile E_a ve B_a hesaplanabilir.

$$E_a=(\frac{\gamma_1 E_b+B_b}{2\gamma_1})e^{i\delta}+(\frac{\gamma_1 E_b-B_b}{2\gamma_1})e^{-i\delta} \quad (2.37)$$

$$B_a=(\frac{\gamma_1 E_b+B_b}{2})e^{i\delta}-(\frac{\gamma_1 E_b-B_b}{2})e^{-i\delta} \quad (2.38)$$

$$E_a=E_b\cos\delta+B_b(\frac{i\sin\delta}{\gamma_1}) \quad (2.39)$$

$$B_a=E_b(i\gamma_1\sin\delta)+B_b\cos\delta \quad (2.40)$$

E_a ve B_a , E_b ve B_b cinsinden yazılmış olur. Bu eşitlikler matris formunda yazıldığı takdirde,

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & (\frac{i\sin\delta}{\gamma_1}) \\ i\gamma_1\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

ifadesi elde edilir. Bu hesaplamalarda elektrik alan vektörü, gelme düzlemine dik seçilerek yapılmıştır. Eğer manyetik alan vektörü gelme düzlemine dik gelir ise matrisin γ_1 teriminde bulunan kosinüs faktörü pay yerine paydada yer alır:

$$Y_1 = n_1 \frac{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{\cos \theta_{t1}} \quad (2.42)$$

Eş.2.41 ile verilen 2×2 matrise transfer matrisi denir ve genel şekli;

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Eğer kaplama birden çok katmandan oluşursa, her bir katman için ayrı bir matris tanımlanır. Toplam transfer, her bir katman için yazılmış transfer matrisinin çarpımı şeklinde ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_N \begin{bmatrix} E_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$M_1 M_2 \dots M_N = M_T \quad (2.45)$$

Eğer gelen ışın normale paralel geliyorsa, geliş açısı sıfırdır ve

$$Y_1 = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.46)$$

şekline dönüşür.

Normalden gelen ışın için ince film katmanının karakteristik matrisi aşağıdaki şekilde olur.

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{Y_1} \\ i Y_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Bu matrise göre iki özel durum vardır. Bunlardan birincisi çeyrek dalga katmanıdır ki, burada filmin kalınlığı çeyrek dalgaboyunda ($\lambda/4$) faz farkı ise $\pi/2$ dir [2]. Bunun sonucunda matris formu aşağıdaki hale gelir.

$$M_{\frac{\lambda}{4}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{Y_1} \\ i Y_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

İkinci durum ise yarım dalga katmanıdır ki, filmin kalınlığı yarım dalgaboyunda $\lambda/2$ faz farkı ise π 'ye eşittir. Bunun sonucunda matris formu aşağıdaki hali alır.

$$M_{\frac{\lambda}{2}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

2.3.1 Geçirgenlik (T) Ve Yansımada (R)

Transfer matrisi tekniğini kullanarak, yansıtma kaplamaların geçirgenlik (T) ve yansımada (R) miktarları hesaplanabilir:

$$E_a = E_0 + E_{r1} \quad (2.50)$$

$$E_b = E_{t2} \quad (2.51)$$

$$B_a = Y_0(E_0 - E_{r1}) \quad (2.52)$$

$$B_b = E_{t2}Y_s \quad (2.53)$$

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$\begin{bmatrix} E_0 + E_{r1} \\ Y_0(E_0 - E_{r1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i\sin\delta}{Y_1} \\ iY_1\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2} \\ E_{t2}Y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2} \\ E_{t2}Y_s \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Bu matris kullanarak,

$$E_0 + E_{r1} = m_{11}E_{t2} + Y_s m_{12}E_{t2} \quad (2.56)$$

$$Y_0E_0 - Y_0E_{r1} = m_{21}E_{t2} + Y_s m_{22}E_{t2} \quad (2.57)$$

Eşitlikleri elde edilmiş olur.

Yukarıdaki formüller birlikte çözülerek geçirgenlik ve yansımada katsayıları bulunur.

$$t = \frac{E_{t2}}{E_0} \quad (2.58)$$

$$r = \frac{E_{r1}}{E_0} \quad (2.59)$$

Eş.2.54 ve 55 formülleri kullanarak (2.52) ve (2.53) formülleri yeniden düzenlenebilir. Buradan geçirgenlik (t) ve yansımada (r) katsayıları elde edilir:

$$t = \frac{2Y_0}{Y_0m_{11} + Y_0Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}} \quad (2.60)$$

$$r = \frac{Y_0m_{11} + Y_0Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_0m_{11} + Y_0Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}} \quad (2.61)$$

Öte yandan normal paralel geliş açısı için tek katmanlı yansıtma kaplama için yansıtıcılık ve geçirgenlik aşağıdaki şekilde yazılır [34].

$$R = rr^* \quad (2.62)$$

$$T = \frac{Y_s}{Y_0} t t^* = 1 - R \quad (2.63)$$

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 \delta}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \delta} \quad (2.64)$$

$$T = \frac{4n_0 n_s}{(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} + n_1\right)^2 \sin^2 \delta} \quad (2.65)$$

Normal üzerinden gelen bir dalga için faz farkı, t kalınlığında bir filmi geçtikten sonra, $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) n t$ dir. Burada n kırma indisidir ve

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (2.66)$$

ile verilir. Eş.2.67 kullanılarak faz farkını $\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) t$ olarak da yazabiliriz. Yansıtıcılığın değişimi, film kalınlığına ve fazın değişimine bağlıdır. Film kalınlığı çeyrek dalgaboyunun çift katları olursa,

$$t = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4n_1} \quad (2.67)$$

faz farkı,

$$\delta = \frac{2\pi n_1 t}{\lambda_0} = \frac{\pi}{2} \quad (2.68)$$

Bu yüzden $\cos \delta = 0$ ve $\sin \delta = 1$ olur.

Yansıtıcılık değişim miktarları Eş.2.63 ile hesaplanabilir [34].

$$R = \frac{(n_0 n_s - n_1^2)^2}{(n_0 n_s + n_1^2)^2} \quad (2.69)$$

$R = \frac{(n_0 n_s - n_1^2)^2}{(n_0 n_s + n_1^2)^2}$ bu eşitliğe göre $n_1 > n_s$ olduğu zaman yansıtıcılık artar ve $n_s > n_1$ olduğu zaman yansıtıcılık azalır. Eğer yansımanın sıfır olması istenirse;

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s} \quad (2.70)$$

olmalıdır. Bu durumda, kaplama malzemesinin kırma indisi en verimli yansıtma kaplamanın yapılmasında belirleyicidir.

Eğer alttaş cam olursa camın kırma indisi $n_s \approx 1,5$ ve havanın kırma indisi $n_0 = 1$ 'dir. $n_1 = \sqrt{n_0 n_s}$ kullanarak yansıma önleyici kaplamanın malzemesinin

kırma indisi $n \approx 1,2$ civarında olmalıdır. Bu yüzden en iyi malzeme tek katmanlı kaplama için $n \approx 1,37$ ile MgF_2 'dür [34].

2.3.2 Çift Katmanlı Yansıtma Kaplamalar

Tek katmanlı yansıtma kaplamalarla sıfır yansıma elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden çok katmanlı yansıtma kaplar üretilmektedir. Transfer matrisi normalden gelen (0° geliş açısı) tek katmanlı yansıtma kaplama için Eş.2.71 ile verilmiştir [34].

$$M = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{Y_1} \\ iY_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Çift katmanlı yansıtma kaplama için transfer matrisi:

$$M = M_1 M_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{Y_1} \\ iY_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{Y_2} \\ iY_2 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_2}{Y_1} & 0 \\ 0 & -\frac{Y_1}{Y_2} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

ile verilir. Matrisin bileşenleri $m_{11} = -\frac{Y_2}{Y_1}$, $m_{22} = -\frac{Y_1}{Y_2}$ ve $m_{12} = m_{21} = 0$ 'dır. Yansıma katsayısı ise;

$$r = \frac{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} - m_{21} - Y_s m_{22}}{Y_0 m_{11} + Y_0 Y_s m_{12} + m_{21} + Y_s m_{22}} \quad (2.73)$$

$$r = \frac{Y_2^2 Y_0 - Y_s Y_1}{Y_2^2 Y_0 + Y_s Y_1} \quad (2.74)$$

Şeklinde hesaplanır. Öte yandan Y_0 , Y_1 ve Y_s ,

$$Y_0 = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_0 \quad (2.75)$$

$$Y_1 = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} \quad (2.76)$$

$$Y_s = n_s \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t2} \quad (2.77)$$

eşitlikleri ile tanımlanırsa, çift katmanlı yansıtma kaplamanın 0° geliş açısı için yansıması hesaplanabilir:

$$R = \left(\frac{n_0 n_2^2 - n_s n_1^2}{n_0 n_2^2 + n_s n_1^2} \right)^2 \quad (2.78)$$

Sıfır yansıtma için $n_0 n_2^2 = n_s n_1^2$ olması gerekmektedir.

Cam alttaşın $n_s \approx 1,5$ ve ışığın hava ortamından geldiği düşünülürse $n_0=1$ alınabilir. Çift katmanlı yansıtma kaplama üretilmesi için $\frac{n_2}{n_1}=1,23$ olmalıdır. Burada en çok tercih edilen malzeme zirkonyum dioksit ($n_2=2,1$) ve seryum triflorürdür ($n_2=1,65$).

2.4 Yansıtma Kaplama Üretiminde İnce Film Büyütme Metodları

Film büyütme için kullanılan farklı metodlar vardır. Bu yöntemleri üç temel gruba ayırabiliriz: (i) buhar fazda büyütme, (ii) sıvı fazda büyütme ve (iii) katı halde büyütme. Çizilge 2.1’de ince film büyütme tekniklerini verilmiştir.

Çizilge 2.1. İnce film büyütme teknikleri

Buhar fazda büyütme	Sıvı fazda büyütme	Katı fazda büyütme
Kimyasal buhar biriktirme	Sol-jel	Mekanik aşındırma
Fiziksel buhar biriktirme	Kimyasal banyo Elektrokimyasal yöntem	Devitrifikasyon

2.4.1 Buhar Fazda Büyütme

Yüksek kalitede kaplamalar elde etmeyi sağlayan buhar fazında yapılan kaplama teknikleri; kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition (CVD))ve fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition (PVD)) olmak üzere ikiye ayrılır. PVD sisteminde kaplama için kullanılan malzemeler katı olmalıdır ama KBB de gaz veya sıvı fazda olmalıdır [35]. Ayrıca reaksiyon mekanizması, bu iki teknik arasında farklıdır. PVD’de kaynak atomları ile gaz atomlar arasındaki momentum transferi film büyütmenin temel mekanizmasıdır. CVD tamamen kimyasal reaksiyondur. Genel olarak, PVD metal alaşımlar ve bileşik malzemeler için kullanılır. Öte yandan, CVD dielektrik ince filmler ve yarıiletken ince filmler için kullanılır [36].

2.4.1.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği, en fazla 10^{-5} - 10^{-6} Torr taban basınçlı vakum ortamında katı malzeme atomlarının buharlaştırılması veya bir hedef üzerinden saçılarak kopartılması sonucu alttaş üzerine biriktirilmesi ilkesine dayanır.

2.4.1.1.1 Isıl Buharlaştırma Yöntemi

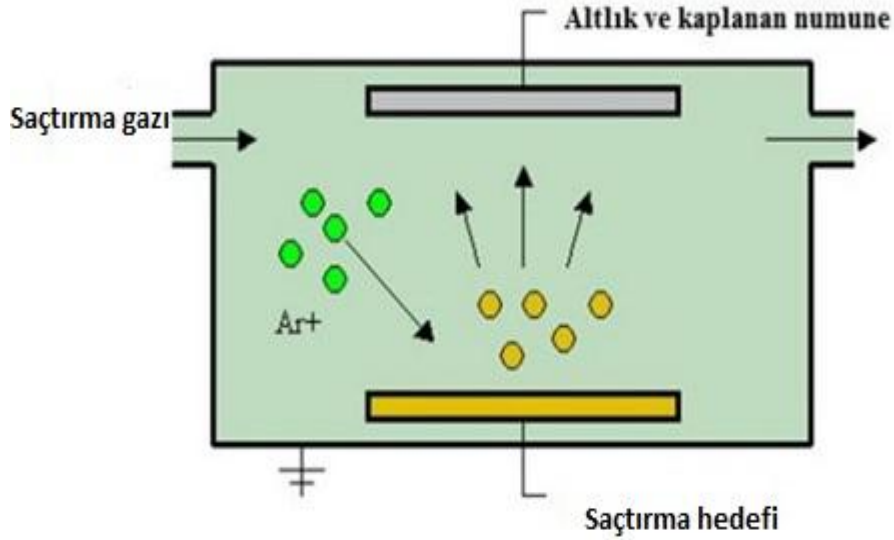
Buharlaştırma yöntemleri, vakum şartları altında ince film üretimi için kullanılan en eski yöntemlerdendir. Yıllardır birçok uygulamada kullanılmakta ve hala

Buharlaştırma, istediğimiz malzemeyi elektron demeti ile veya üzerinden akım geçen bir metal sayesinde dolaylı olarak ısıtılmasıyla vakum ortamında istediğimiz malzeme üzerine biriktirilmesidir. Buharlaştırma işlemi düşük bir taban basınçta gerçekleştirilir ($10^{-5} - 10^{-10}$ Torr). Şekil 2.6'da basitleştirilmiş bir buharlaştırma düzeneğinin gösterimi verilmiştir.

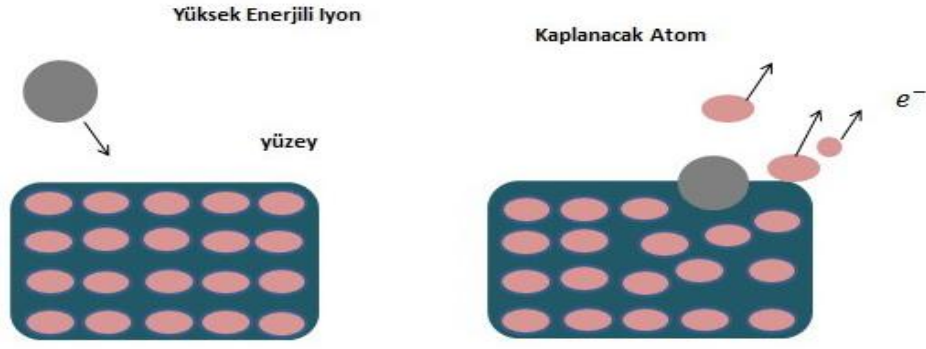
2.4.1.1.2 Saçtırma Yöntemi

17

saçtırma yöntemi “RF Magnetron sputtering” ile üretilen malzemelerin mikroelektronik, optik, manyetik, solar kontrol endüstrisi gibi geniş bir endüstriyel kullanım alanının olması olarak vurgulanmaktadır [44]. Bu teknik çok tabakalı film büyütme içinde elverişli bir yöntem olduğu ve bu yöntem kaplama işlemi sırasında sıcaklık, film kalınlığı, kaplama oranı ve gazın kimyasal bileşimi gibi kaplama parametrelerinin iyi bir şekilde kontrolünü sağladığı bilinmektedir [42]. Çok tabakalı filmlerin büyütülmesinde genellikle çok hedefli saçtırma sistemleri kullanılmaktadır [43]. Saçtırma sisteminin basit çalışma şeması Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Şekil 2.8’de saçtırma mekanizması verilmiştir [45]. Sonuç olarak saçtırma ile elde edilen filmin kalitesi ve yapısı mükemmeldir. Yöntemin dezavantajları olarak ise limitli kaplama kalınlığı, yüksek maliyeti sayılabilir çünkü saçtırma yöntemindeki elektrik tüketimi buharlaştırmaya nazaran çok daha fazladır ve saçtırma yöntemi küçük yüzeylerin kaplanmasında verimli olabilmesine rağmen, geniş yüzey kaplamalarında aynı verimin elde edilememesi sebebi ile geniş yüzey optik kaplamalarda tercih edilmemektedir [46].



Şekil 2.7. Saçtırma cihazının çalışma şeması



Şekil 2.8. Saçtırma mekanizması [45]

2.4.1.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB)

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, bir kapalı hacim içine kimyasal gazların salınmasıyla ortamda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu, alttaş üzerine ince film oluşturma/biriktirme yöntemidir. Bu yöntemde alttaban sıcaklığını, gücü ve gaz karışım miktarı değiştirilerek farklı alaşımlar elde edilebilir.

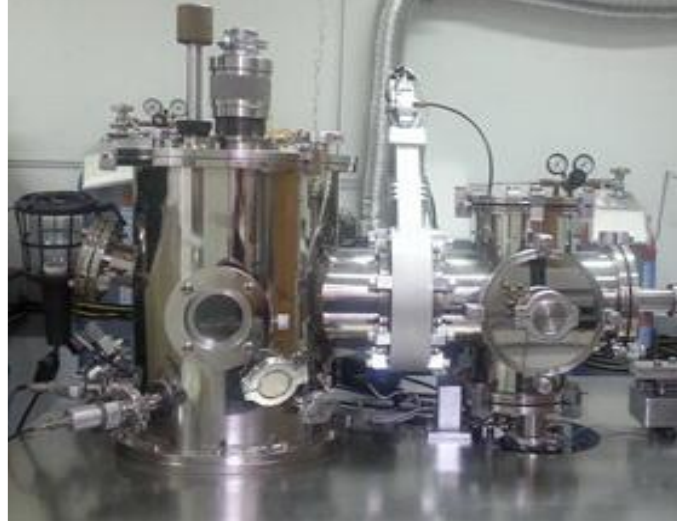
Kimyasal buhar biriktirme bir kaç yöntemle yapılabilir:

1. (PECVD) plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
2. Isıl CVD
3. Sıcak tel CVD
4. Foto CVD (Lazer CVD)

2.4.1.2.1 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD)

Bu yöntemde, CVD plazma desteği ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde plazmanın yoğunluğu, alttaş sıcaklığı ve basınç miktarı önemlidir. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme metodunda, dışardan uygulanan radyo frekansı (RF) mertebesinde çalışan elektrik sinyali, film büyütme odasına uygulanır ve elektrik alan oluşturarak ortamdaki gazların vakum ortamında yapısını bozarak belli bir sıcaklıkta alttaş üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Plazma, film büyütme odasında, paralel duran iki elektrotun arasında oluşur. Bu yöntem ile büyütülen hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmlerin elektriksel ve optik özellikleri, film büyütme koşullarına bağlıdır. Bu koşulların en önemlileri, alttaş sıcaklığı, vakum odasının basıncı, gaz akış hızları, pompalama hızı ve RF gücüdür.

Vakum odası basıncı, plazma içindeki çarpışmaları ve parçacıkların ortalama serbest yollarının değişiminde etkindir. Vakum odasındaki gaz akış hızı, vakum pompasının pompalama hızına bağlıdır. Alttaş sıcaklığı ise film oluşumundaki kimyasal tepkimeleri kontrol eder [47]. Şekil 2.9'da plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sistemi verilmiştir. PECVD metodu, diğer hazırlama yöntemlerine göre hem daha kolaydır ve hem de bu yöntemle hazırlanan a-Si:H filmlerin kalitesi saçırtma ya da buharlaştırma ile üretilmiş a-Si:H'ye göre daha iyidir.



Şekil 2.9. Çift odacıklı PECVD sistemi

2.4.2 Sıvı Fazda Büyütme

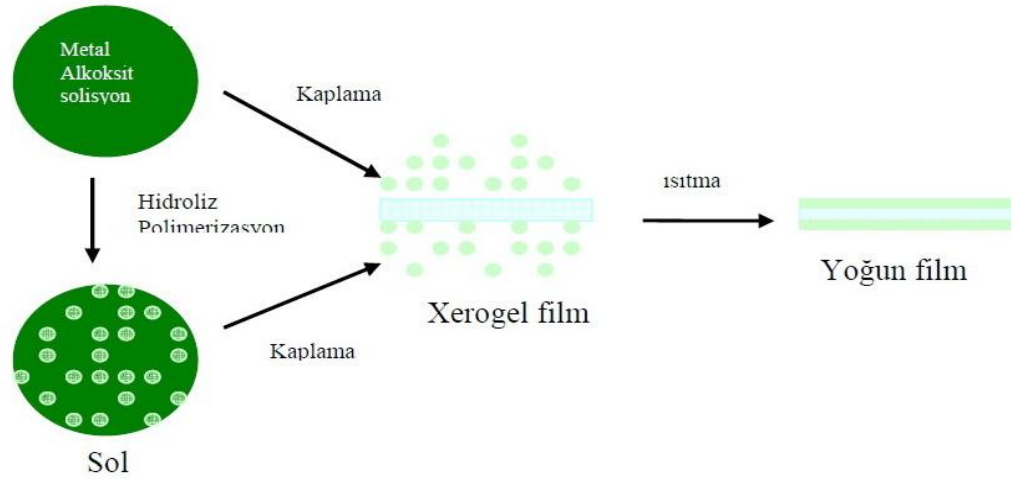
Sıvı fazda büyütme teknikleri sol-jel, kimyasal banyo ve elektrokimyasal yöntem olmak üzere üç gruba ayrılır.

2.4.2.1 Sol-Jel Yöntemi

Sol-jel yöntemi ince film elde etmek için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Genel olarak sol-jel sürecinde sistem sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçiş yapar [48]. Bunlar; oldukça saf ve küresel biçimli tozlar, ince film kaplamalar, seramik fiberler, mikro gözenekli inorganik zarlar, monolitik seramik ve camlar ya da aşırı gözenekli aerjel malzemelerdir [48]. Tipik bir sol-jel sürecinde ana malzeme çözücü içinde çözünüp bir seri hidroliz ve polimerizasyon tepkimeleri ile koloidal bir yapı olan “sol”e dönüşür [48]. “Sol” üzerinde devam eden süreçler sonunda farklı formlarda seramik malzemeler üretilebilir [48]. İnce filmler ise bir alt tabaka üzerine “sol”ün döndürme, püskürtme, daldırma kaplama yöntemleri ile kaplanmasıyla üretilir. “Sol” bu alt tabaka üzerine kaplandığında ıslak jel (xerojel) haline dönüşür ve daha

sonra sıcaklık uygulanması ve kurutma ile yoğun jel haline geçerek ince film meydana gelir [48].

Bu yöntemde kullanılan alet ve malzemeler çok basittir [49,50]. Bu yöntemle kaplanarak elde edilmiş filmlerin kalınlığı yüzeyin her yerinde aynıdır ve saf bir kaplama elde edilir . Enerji tasarrufu sağlar, hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaz ve her türlü geometrik şekle sahip malzemeler üzerine bu yöntemle kaplama yapılabilir öte yandan, bu yöntemin de avantajları da vardır. Bunlardan bazıları; malzemenin maliyeti fazladır ve kaplama sırasında malzeme kaybı fazla olur. Ayrıca kullanılan kimyasallar sağlığa zararlı olabilir. Şekil 2.10'de sol-jel tekniği ile ince film kaplanmasını göstermektedir [48].



Şekil 2.10. Sol-jel tekniği ile ince film kaplanmasının şematik gösterimi [48]

2.5 Yansıtma Kaplamalarda Kullanılan Malzemeler

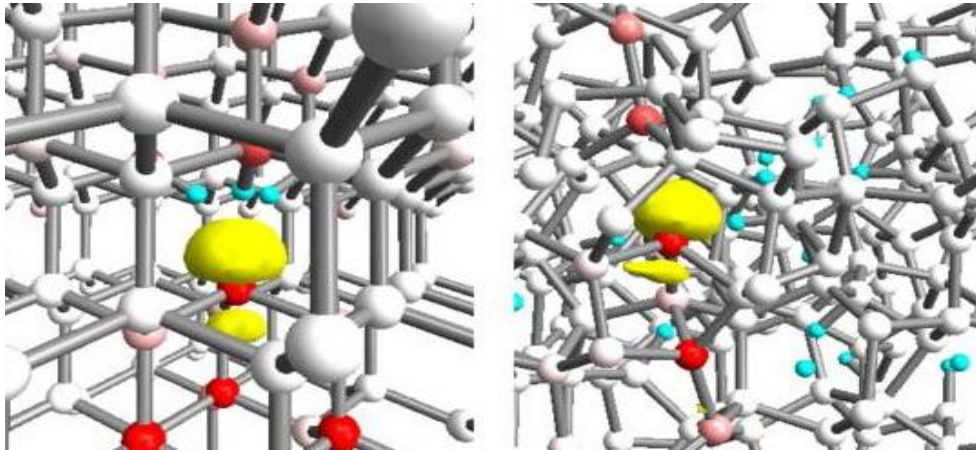
Yansıtma kaplamalar, optik aygıtın üzerine düşen ışığın yansıma miktarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. İyi kalitede bir yansıtma kaplama için düşük ve yüksek kırma indisli malzemelerin birlikte kullanılması gerekmektedir. Üretilen güneş pillerinde hava ortamından aygıt üzerine düşen ışık, genellikle, ya kristal silisyum ya da cam arayüzeyine gelmektedir. Kristal silisyumun kırma indisi, görünür bölge için yaklaşık 3,5'tir. Camın kırma indisi ise yine görünür bölge için 1,5'tir. Tek katman yansıtma kaplamalar için, kırma indisleri arasındaki ilişkiyi teorik olarak belirleyen Eş.2.70'e göre; cam altta üzerine üretilen ince film güneş pilleri için en etkin kaplama kırma indisi 1,22, kristal silisyum güneş pillerinde yapılacak en verimli yansıtma kaplama kırma indisi 1,84 olarak hesaplanabilir. En

çok kullanılan yansıtma kaplama malzemeleri, magnesium floride (MgF_2) ($n \approx 1,4$), titanyum dioksit (TiO_2) ($n \approx 2,3$), silisyum nitrür (Si_3N_4) ($n \approx 1,9$), alüminyum oksit (Al_2O_3) ($n = 1,8-1,9$), silisyum dioksit (SiO_2) , ($n = 1,4-1,5$) tantal pentoksit (Ta_2O_5) ($n = 2,1-2,3$) [51]. Son yıllarda hidrojenlendirilmiş amorf silisyum oksijen ($a-SiO_x:H$) ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot alaşımları da ($a-SiN_x:H$) yansıtma kaplamalar için kullanılmaktadır [52].

2.6 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum ($a-Si:H$)

Amorf yarıiletkenleri, yakın mesafelerde atomların yaptığı bağ sayısı, bağ uzunluğu ve bağ açıları, kristal yarıiletkenler ile aynı özellikleri göstermektedir. Amorf yarıiletkenlerde ise uzak erim bağ açıları ve bağ uzunlukları fark eder [47]. Bu farklılıktan dolayı ortaya çıkan zayıf bağlar ve kusurlar, kopuk bağlar meydana getirirler [47]. Şekil 2.11'de kristal silisyum ve amorf silisyum yapıları karşılaştırmaktadır.

Kusurlar nedeniyle, kristal içinde periyodik bir potansiyel enerji dağılımı yoktur. Yasak enerji aralığındaki kusurlar nedeni ile yerelleşmiş örgü noktalarına ait enerji düzeyleri oluşur. Amorf yarıiletkenlerde yerelleşmiş enerji düzeylerinin varlığı nedeniyle kristal silisyum gibi yasak enerji aralığı belirlenemez. Bu yerelleşmiş enerji düzeylerinin dağılımı, amorf silisyumun elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynar.



Şekil 2.11. Kristal silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapıları

Amorf silisyumda var olan kopuk bağların sayısını azaltmak için hidrojen etkindir [47,53]. Plazma biriktirme sisteminde silan gazının bileşenlerine ayrıştırılmasıyla

hazırlanan hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda (α -Si:H), yüksek mobilitesi ile hidrojen atomların daha düzenli bağlanmasına yardımcı olur. Genel olarak hidrojenlendirilmiş amorf silisyum PECVD sistemi ile alttaş üzerine büyütülür. Filmin büyütülmesi sırasında alttaş sıcaklığı, gaz akış hızı, kazan basıncı ve pompalama hızı değişmez tutulması gerekmektedir. Çünkü tüm deney parametreleri üretilen örneğin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde etkindir.

SiH_4 gazının plazması içinde birçok serbest kökçe oluşur (SiH_3 , SiH_2 , SiH vb.). Bunlardan en çok rastlanan tür SiH_3 'tür ve kaliteli film oluşumunda en etkin rolü bu kökçe üstlenir. SiH_3 kökçelerinden birisinin alttaş üzerindeki uygun konumlardan birisine tutunmasıyla film oluşumu başlar. Film oluşumu sürecinde yüzey, hidrojen atomları ile kaplıdır. Plazma içindeki diğer kökçeler, yüzeydeki bu hidrojen atomlarını kopararak plazmaya taşırlar. Geride kalan kopuk bağa, plazma içindeki SiH_3 kökçelerinden birisi tutunur. Böylece film büyümesi devam eder [54,55]. SiH_3 kökçelerinin yüzey difüzyonu sıcaklıkla artar [56]. 200°C 'den daha düşük sıcaklıklarda SiH_3 yüzey difüzyonu az olacağından kopuk bağlara tutunma olasılıkları da azalır. Bu kopuk bağlar büyüyen film içinde kalır ve örneğin kusur yoğunluğu artar. Sıcaklığın artırması ile SiH_3 yüzey difüzyonu da artar. Sıcaklığın daha da fazla olmasıyla H atomlarının yüzeyden kopma hızı da artar. Ancak SiH_3 kökçelerinin plazma içindeki sayısı ve yüksek yüzey difüzyonu bunu karşılamaya yetemeyeceğinden kopuk bağ yoğunluğu artış gösterir [55]. RF gücünün artması ile elektronların birim zamanda yaptığı çarpışma sayısı da artar. Böylece SiH_2 ve SiH türlerinin yoğunlukları da artar [56]. SiH_2 ve SiH türlerinin artması, film yüzeyindeki kopuk bağların sayısını da artırır [55]. SiH_2 ve SiH plazma içindeki SiH_4 moleküllerine tutunarak, daha büyük moleküller oluştururlar. Bu büyük moleküllerin oluşumu film oluşum hızını büyütür. Ancak bu durumda üretilen filmin kalitesi bozulur [57].

2.6.1 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Alaşımları

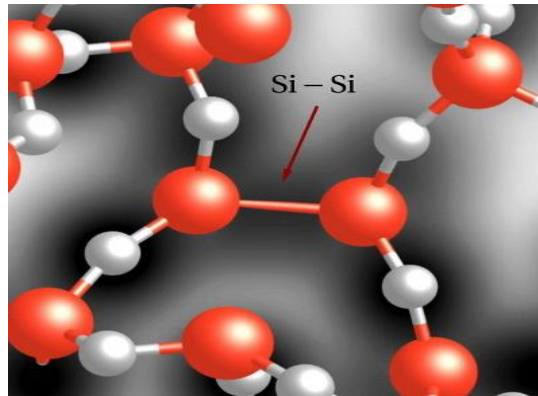
Yansıtma kaplamalarda kullanılan malzemeler arasında düşük sıcaklıklarda, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ile üretilen filmler, mükemmel yüzey pasivasyon kalitesine sahiptirler [58]. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum oksijen (α - $\text{SiO}_x\text{:H}$) ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot (α - $\text{SiN}_x\text{:H}$)

alaşımları, a-Si:H tabanlı malzemeler arasında en çok tercih edilen yansıtma kaplama malzemelerindendir [59,60].

2.6.1.1 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Oksijen Alaşımları (a-SiO_x:H)

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum oksijen, diğer amorf silisyum tabanlı alaşımlarla karşılaştırdığımızda daha yüksek fotoiletkenlik gösterirler [56]. Bu malzemenin en iyi özelliklerinden birisi, optik geçirgenliğinin fazla olması ve güneş pillerinde pencere malzemesi olarak kullanılmasıdır [61]. a-SiO_x:H yapısındaki oksijen miktarı yasak enerji aralığını belirler. a-SiO_x:H ince filmler, PECVD sisteminde CO₂ ve SiH₄ gaz karışımı ile üretildiğinde, gaz karışım oranı ayarlanarak istenilen kırma indisi elde edilmesi daha kolaydır.

Öte yandan amorf silisyum yapıya giren oksijen atomları, hidrojen gibi kopuk bağları doyurucu özellik gösterdiğinden kopuk bağ kusur yoğunluğu beklenen oranda artmaz [62,63]. Şekil 2.12'de SiO₂ çizimi verilmiştir.



Şekil 2.12. SiO₂ yapısı

a-SiO_x:H üretmesinde, silan (SiH₄) gazı ve oksijen içeren diğer bir gazın radyo frekansı (RF) plazması kullanılarak bir alttaş üzerine ince film olarak büyütülmesi en yaygın kullanılan yöntemdir. SiH₄ gazı RF plazması ile kökçelere ayrılır. Bu kökçeler arasında en büyük konsantrasyona sahip olan kökçe silildir (SiH₃). SiH₃'ün çok uzun ömür süresinin olması nedeniyle, iyi nitelikli filmin büyümesinde oldukça etkindir [64].

Bir silil kökçesi yüzeye geldiğinde, ya yüzey tarafından tutulur ve yüzeyin dağılmasına neden olur veya hidrojeni koparır. Oksijen atomu içeren gaz karbon dioksit (CO₂) kullanıyoruz ve iki gazın karışımının plazmasını inceliyoruz.



H atomunun film büyütmesinde iki önemi rolü vardır. Birincisi mobilitesi büyüktür ve bu neden ile kökçelerin yüzeye yapışmasını kolaylaştırıyor. İkincisi ise kopuk bağ kusurlarının doyurulmasını sağlar [65]. Aynı zamanda H atomları, plazma içinde CO₂'nin ve SiH₄'nin parçalanmasını sağlar.



a-SiO_x:H ince filmin büyüme süresinde yapıya giren O miktarı film büyüme hızını artıracaktır [65].



R, yüzeydeki Si atomunun yaptığı diğer bağları göstermektedir. Si-OH plazma içerisindeki H, OH⁻ ve SiH₃ ile tepkimeye girebilir.



En sonunda yüzeyde oluşan Si-O⁻ yapısı plazmadaki kökçelerle yine reaksiyona girer.



Bu reaksiyonların sonucunda a-SiO_x:H ince film oluşacaktır. a-SiO_x:H düşük sıcaklıklarda büyütülebilir ve yüzey pasivasyon için en yaygın malzemedir [61].

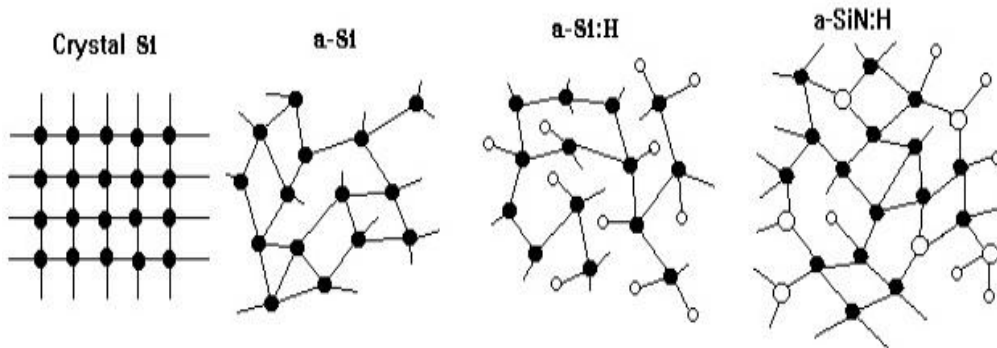
2.6.1.2 Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum Azot Alaşımı ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$)

Son yıllarda hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot alaşımları ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$), yansıtma kaplamalarda en çok kullanılan malzemelerden birisidir [59,60]. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot alaşımı ($a\text{-SiN}_x\text{:H}$) ince filmler yüksek erime sıcaklığı, düşük mekanik stres ve termal etkilere karşı güçlü dirençlerinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarına uygun yapılardır [67].

$a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yalıtkan malzeme olarak alan etkili transistörlerde [68] ve yansıtma önleyici kaplama yapımında kullanılır [59,60]. Ticari olarak kullanılan silisyum güneş pillerinin çoğu $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ kaplanmıştır [68]. Bunun nedeni $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ 'nin elektriksel pasivasyon özelliklerinin iyi olması ve yansıtma özelliğinin çok verimli olmasıdır [68]. Azot oranı düşük tutulduğunda $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yasak enerji aralığının çok artmamasının yanında iletkenliğinin arttığı bilinmektedir [52].

$a\text{-SiN}_x\text{:H}$ büyütülmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır: Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) tekniği, düşük basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) ve püskürtme vb. [69].

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) tekniğinde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot alaşımı ince filmler, silan (SiH_4) gazı ve azot içeren diğer bir gazın (SiH_4+N_2 ya da SiH_4+NH_3) radyo frekansı (RF) plazması kullanılarak bir alttaş üzerine yansıma önleyici kaplaması olarak büyütülür [70]. Gaz akış oranı değiştirilerek büyüyen filmin kırma indisi 1,8'den 3,3'e kadar değiştirilebilir [71,72]. Şekil 2.13'te hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot yapısı tek kristal silisyum, amorf silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.13. Kristal silisyum, amorf silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum azot yapısı

2.7 Güneş Gözesi

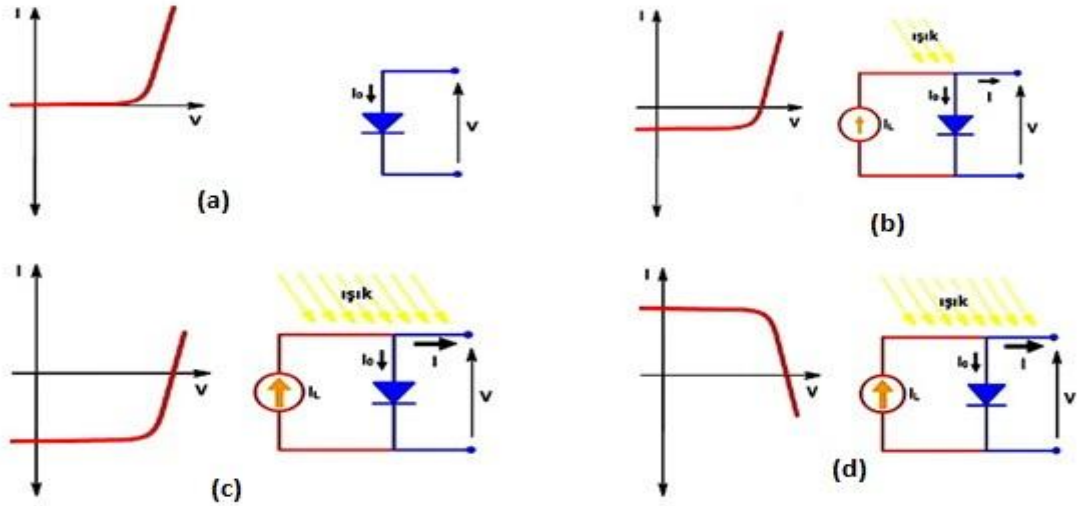
Güneş gözesi, yüzeyine gelen ışığı doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir yarıiletken aygıttır [73]. Güneş gözesi üzerine düşen ışık, akım ve gerilim üreterek güç oluşmasına neden olur [74].

2.7.1 Fotovoltaik Etki

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Bir başka deyişle üzerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Yarıiletken malzeme üzerine, enerjisi yasak enerji aralığından daha büyük ya da eşit enerjiye sahip olan bir foton düştüğünde, bir elektron-boşluk çifti oluşur. Yapısal elektrik alan ile elektron boşluk çiftleri birbirinden ayrılır. Ayrılan bu yüklü parçacıklar güneş gözesinin ön ve arka kontakları arasında bir voltaj düşmesine neden olur. Eğer güneş gözesi bir yüke bağlanırsa, toplanan yük taşıyıcılar akım oluşturur. Akıma gelen en büyük katkı tükenme bölgesinde ya da tükenme bölgesine bir azınlık taşıyıcı difüzyon uzaklığı kadar mesafede üretilen elektron – boşluk çiftleri katkı sağlar.

2.8 Akım - Gerilim Eğrisi

Güneş gözesi yarıiletken malzeme olması nedeniyle karanlık altında olduğu süreci elektriksel özelliği diyotla aynıdır. Eğer güneş gözesi aydınlatma altında olursa I-V eğrisi değişir. Güneş gözesi üzerine düşen ışınlam miktarı arttıkça üretilen elektrik akımı da artmaktadır. Güneş gözesinden elde edilen gerilim ise V ile gösterilmektedir. Şekil 2.14'te aydınlatma şiddetinin IV eğrisi üzerine etkisi verilmiştir [75].



Şekil 2.14. (a) Karanlıkta olan güneş gözesinin elektriksel özelliğini, (b) ve (c) Güneş gözesinin aydınlatma altında güç üretmesini ve güç ürettiği zaman I-V eğrisinin kaymasını ve (d) ise güneş gözesinin ürettiği güç genellikle 1.çeyreğe taşınır.

Bir fotovoltaik pilin dış devreye verdiği akım miktarı kısa devre akımı (I_L) ile diyot üzerinden geçen akımın (I_D) farkına eşittir.

$$I = I_L - I_D \quad (2.92)$$

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.93)$$

Bu ifadede; k Boltzman sabiti, T pilin mutlak sıcaklığı, q elektron yükü, v pil üzerinde düşen gerilim ve I_0 büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olarak değişen karanlık doyma akımı değerini göstermektedir.

Aydınlatma altında elde edilen I-V eğrisinde dört önemli değer vardır. Bunlar kısa devre akımı, açık devre voltajı ile maksimum güç üretilen akım ve gerilim (I_{maks} , V_{maks}) değerleridir.

2.8.1 Kısa Devre Akımı

Kısa devre akımı, I_{SC} , güneş gözesinin üzerindeki gerilimin sıfır olduğu zaman ürettiği akımdır. Kısa devre akımı, ışığın elektron boşluk çiftleri üretmesine ve taşıyıcının toplama olasılığına (collection probability) bağlıdır. Kısa devre akımı güneş gözesinden çıkan maksimum akımdır. Yüzey pasivasyonu iyi yapılmış olan güneş pillerinin akım yoğunluğu Eş.2.94 ile verilir.

$$J_{SC}=qG(L_n+L_p) \quad (2.94)$$

Burada G elektron boşluk üretim hızını ve L_n, L_p azınlık taşıyıcı difüzyon uzaklığını göstermektedir.

Kısa devre akımı genel olarak şu faktörlere bağlıdır [73]:

- Güneş gözesinin yüzey alanı
- Optik özellikleri
- Güneş gözesinin toplama olasılığı
- Gelen ışığın spektrumu

2.8.2 Açık Devre Gerilim

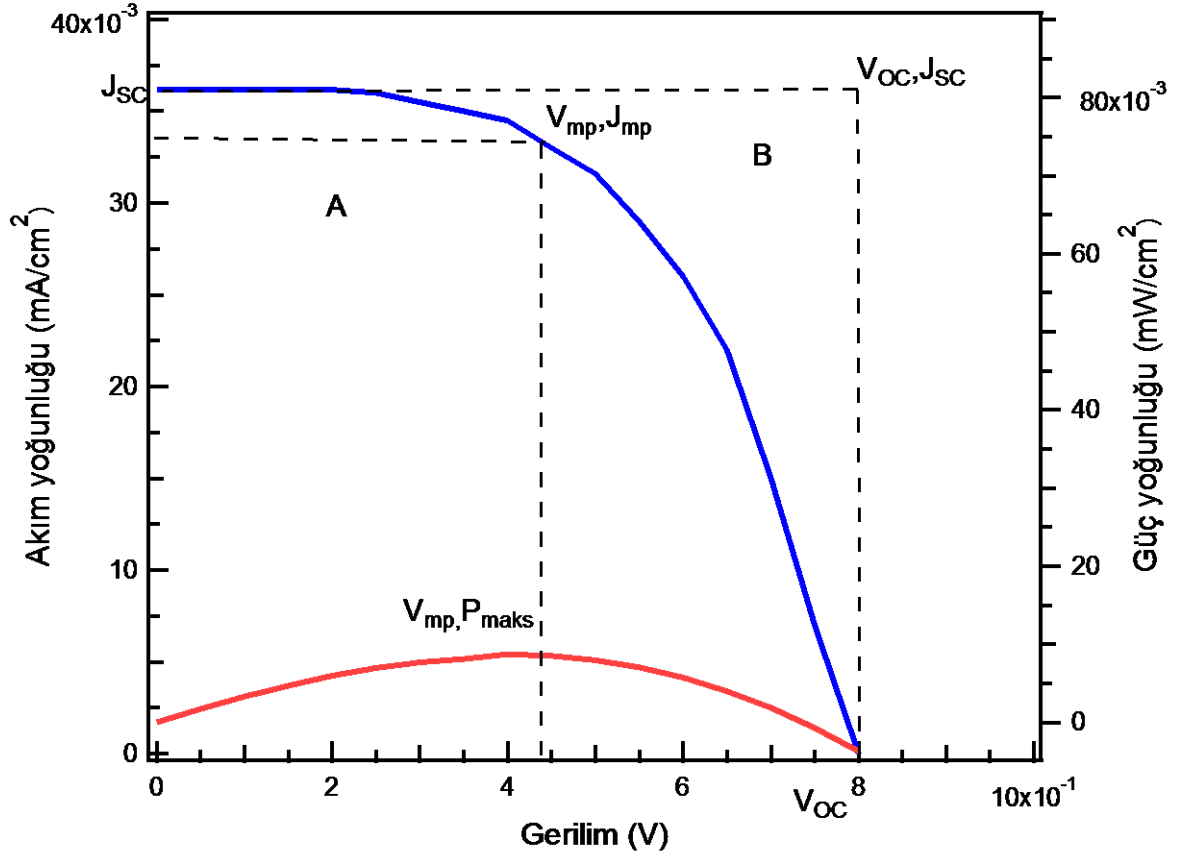
Açık devre voltajı, V_{OC} , güneş gözesinden sıfır miktarda akım geçtiğinde (yani açık devre yaptığında) ve güneş gözesinden elde edilen maksimum voltajdır. Açık devre voltajı Eş.2.95 ile hesaplanır.

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.95)$$

I_0 karanlık doyma akımı, I_L , aydınlatma altında üretilen akımı göstermektedir. Şekil 2.15'te kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre voltajının da işaretlendiği akım yoğunluğu-gerilim grafiği verilmiştir.

2.9 Doluluk Oranı

Doluluk oranı, FF, güneş gözesindeki maksimum gücün bir göstergesidir. Doluluk oranı güneş gözesinden üretilen maksimum güç miktarının kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına olan oranıdır. FF, Eş.2.96 ile hesaplanır. Şekil 2.15'te doluluk oranının nasıl bulunduğu göstermektedir [75]



Şekil 2.15. Güneş gözesinden elde edilen akım-gerilim eğrisi (mavi) ve güç-gerilim eğrisi (kırmızı)

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\text{bölge A}}{\text{bölge B}} \quad (2.96)$$

2.10 Tayfsal Duyarlılık

Tayfsal duyarlılık (Spectral response-SR) güneş gözesinde, dalgaboyu miktarına bağlı kısa devre akımının, güneş gözesi yüzeyine düşen güç yoğunluğu oranına eşittir [76]. Güneş gözelerin performansının değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden birisi tayfsal duyarlılığın hesaplanmasıdır, çünkü tayfsal duyarlılık, güneşten gelen radyasyonun spektral dağılımına da bağlıdır. Güneş gözesinin tayfsal duyarlılığı, Eş.2.97 ile verilir.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad (2.97)$$

Burada QE, kuvantum verimliliği göstermektedir. QE, gelen foton sayısı başına, akıma katkıda bulunan elektron boşluk çifti sayısıdır.

2.11 Güneş gözesinin Verimi

Güneş gözesinin verimi, güneş gözesinin ürettiği gücün güneşten gelen güce oranı olarak tanımlanır. Güneş gözesinin verimi AM1,5 aydınlatması altında ve 25°C sabit sıcaklıkta ölçülür,

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_0} \quad (2.98)$$

ile tanımlanır. Burada P_0 güneş gözesinin üzerine düşen optik güçtür. P maks ise güneş gözesinin AM1,5 aydınlatması altında ürettiği en büyük güçtür.

$$P_{\max} = I_m V_m \quad (2.99)$$

$$P_{\max} = V_{OC} I_{SC} FF \quad (2.100)$$

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} \quad (2.101)$$

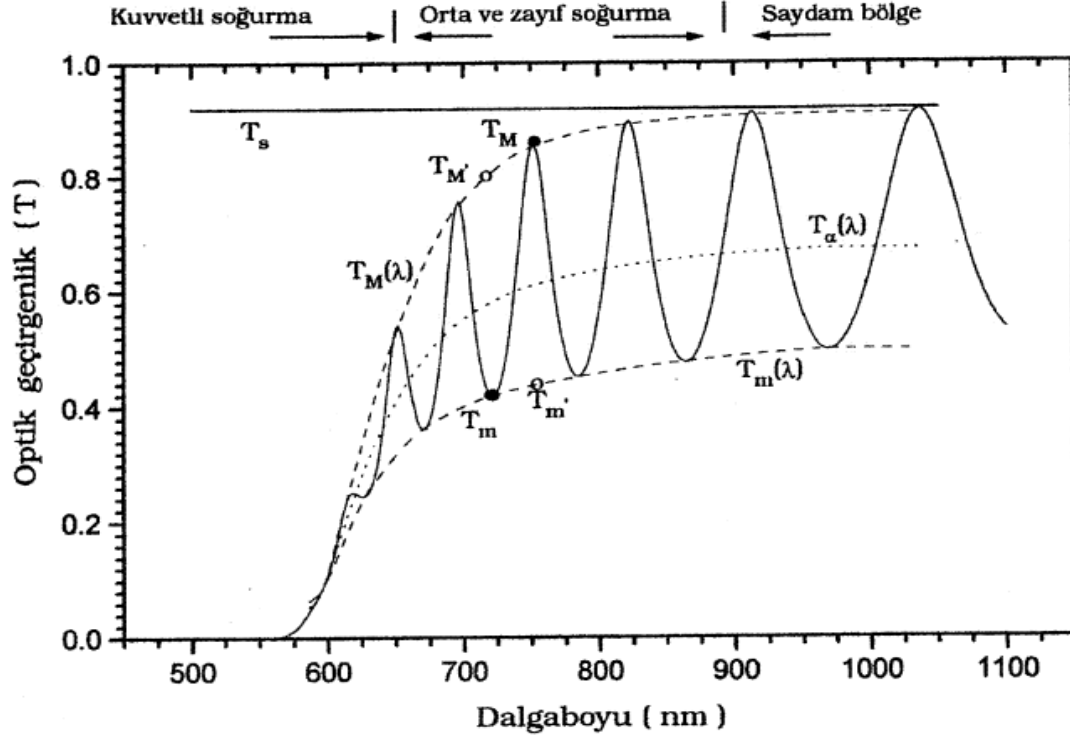
P_{in} , giriş gücü verim hesaplamalarında, AM1,5 G'nin şiddeti olan 1kW/m² veya 100 mW/cm² kullanılır.

2.12 Güneş Simülatörünün Tanımı

Güneş simülatörü laboratuvar koşullarında güneş spektrumuna yakın bir spektrum elde ederek, güneş gözesinin karakterizasyonunda kullanılan bir aydınlatma kaynağıdır. Güneş simülatöründe güneş ışığına yakın ışık elde etmek için, zenon lamba, metal halojenür arc lamba, kuartz-halojen lamba ve LED' ler kullanılmaktadır.

2.13 Optik Geçirgenlik

Büyütülmüş filmlerin, optik geçirgenlik deneylerinden elde edilen verileri kullanılarak filmlerin kalınlığı, optik bant aralığı, dalga boyuna bağlı kırma indisi ve bant üstü bölge için optik soğurma spektrumu bulunabilir. Şekil 2.16'da saydam bir tabakanın üzerine büyütülmüş bir filmin optik geçirgenlik spektrumu mevcuttur [77]. Gelen ışığın, ince film-hava ve ince film-cam ara yüzeylerinden geçerken yaratacağı çoklu yansımalar sonucu girişim deseni oluşacaktır.



Şekil 2.16. Bir a-Si:H filmin optik geçirgenlik spektrumu

Eğer optik geçirgenlik spektrumu düzgün girişim saçakları gösterirse, Swanepoel (1983) tarafından geliştirilen yöntemle ince film kalınlığını d , kırma indisi $n(\lambda)$ ve optik soğurma katsayısı $\alpha(\lambda)$ bulunabilir [78].

Eğer filmin kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü veya asimetrik büyüme nedeniyle farklılık gösteriyorsa, saçakların genel şekli korunsa da girişimin zayıflaması sonucu optik geçirgenlik zarf eğrileri birbirine yaklaşır [77].

Swanepoel tarafından önerilen yöntemle önce bu spektrumun tepe ve çukur noktalarından geçen zarf eğrileri çizilir her uç noktaların teğet geçtiği sanal ($T_{M'}$ ve $T_{m'}$) ve gerçek (T_M ve T_m) noktalar belirlenir. Her bir teğet noktasının diğer zarf eğrisi için karşılığı bulunur. Bu noktaların hangi mertebeden girişim koşulunu sağladığı bulunur ve bunun yardımıyla ince filmin, film kalınlığı (d) hesaplanır ve film kalınlığını kullanarak dalgaboyuna bağlı kırma indisi değerlerini hesaplanır:

$$n(\lambda) = a \frac{1}{\lambda^2} + n_{KA} \quad (2.102)$$

Burada n_{KA} , uzun dalgaboyları için kırma indisinin ulaştığı değerdir ($\lambda \rightarrow \infty$; $n(\lambda) = n_{KA}$) ve a bir katsayıdır. Uzun dalgaboyu için kırma indisi bulunduktan

sonra zarf eğrileri değerleriyle enerji düzeylerine göre soğurma spektrumu belirlenir [77].

Soğurma spektrumunun belirlenmesiyle $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}} - h\nu$ grafiği çizdirilerek optik yasak enerji aralığı belirlenmeye çalışılır. Bunun için soğurmanın yüksek olduğu bölümden yararlanılır [78]. Bu bölümde optik soğurma katsayısının enerjiye bağımlılığı,

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}} = \text{sabit} (h\nu - E_g^{\text{Tauc}}) \quad (2.103)$$

şeklindedir [79,80]. Bu yöntemi, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için, Tauc v.d. 1966 yılında önermiştir [77]. İncelemesinde kullandığı a-Si:H filmlerin Tauc optik bant aralığının, film kalınlığı azaldıkça arttığının sonucuna varmıştır [81].

Cody v.d. ise 1982' de bu yöntem yerine $(\frac{\alpha}{h\nu})^{\frac{1}{2}} - h\nu$ grafiği çizdirilerek optik bant aralığına karar verilmesini önermiştir [82]. Cody v.d' nin önerdiği bu değişiklik ile optik bant aralığının belirlenmesinde film kalınlığı önemsiz hale gelmiştir [80].

3. ÖRNEK HAZIRLAMA VE ÖLÇÜM SİSTEMLERİ

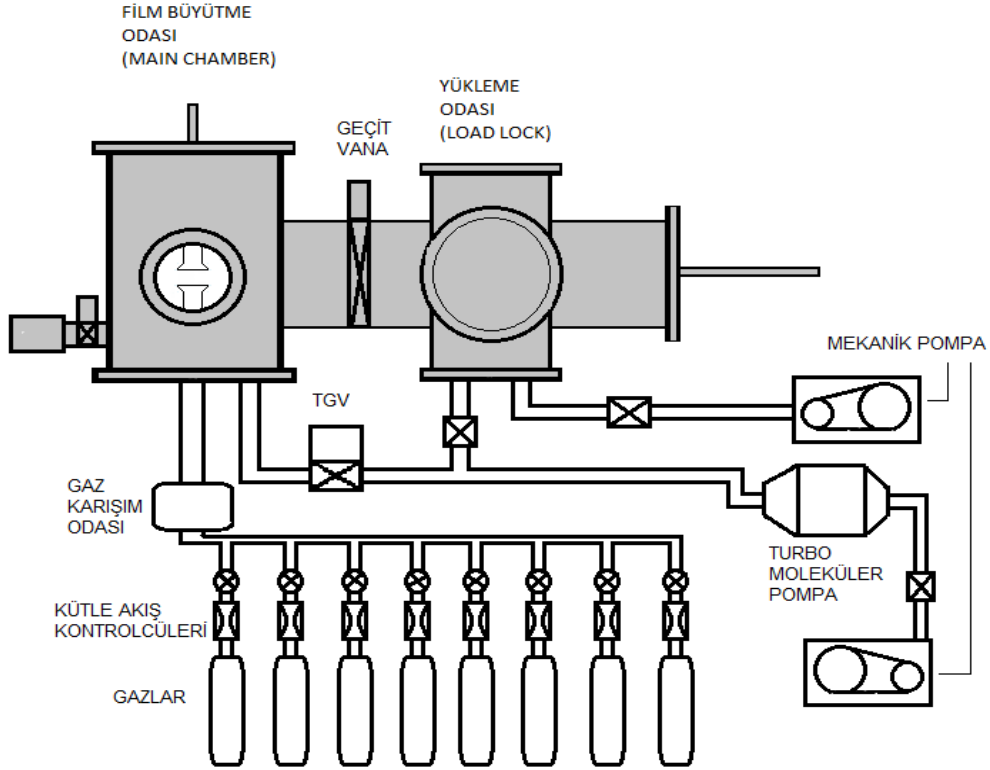
Bu bölümde örneklerin üretilmesinde kullanılan yöntemler ve daha sonra optik özelliklerinin incelenmesinde kullanılan sistemlerin nasıl çalıştığı ve ölçüm tekniklerinden söz edilmiştir.

3.1 PECVD Sistemi

Yansıtma kaplamaların üretiminde farklı yöntemler kullanılabilir. Bu tez kapsamında hazırlanmış tüm örnekler, iki odacıklı plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) sisteminde üretilmiştir. Vakum odacıklarından birisi prosesin gerçekleştiği ana odacık, diğer ise yüklemenin yapıldığı odacıktır. Ana odacığın içinde, birbirine paralel duran anot ve katot arasına RF gücü uygulanarak plazma elde edilir. Alttaşlar, ısıtılan anoda (üst elektrot) yerleştirilir. Reaktif gazlar, düş başlığı biçiminde tasarlanmış katot yüzeyinden vakum odacığına akmaktadır. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince filmlerin hazırlanmasında, sırasıyla SiH₄ + CO₂ ve SiH₄ + N₂ gaz karışımları kullanılmıştır. Tüm örneklerde SiH₄ gazı akışı 2 sccm olarak ayarlanmıştır. CO₂ veya N₂ gazı ise 8 sccm olarak ayarlanarak toplam akış 10 sccm olarak sabitlenmiştir. Gaz akışları, kütle akış kontrolcülerini ile ölçülmüş ve ayarlanmıştır. Hazırlanan örneğin özelliklerinin kontrol edilebildiği, diğer deney parametreleri ise alttaş sıcaklığı, reaktör basıncı ve RF gücüdür. Bu parametreler, sırasıyla, 200 °C, 400 mTorr, a-SiO_x:H için 10 W ve a-SiN_x:H için 12 W olarak seçilmiştir.

Kullanılan alttaşlar ise ticari olarak satın alınan Corning 1737F cam ve Bor katkıli tek kristal silisyumdur (Cz (110), 1-30 Ωcm). Cam alttabanlar üzerine üretilen ince filmler, örneklerin kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla, optik geçirgenlik ölçümlerinde kullanılmıştır. Tek kristal silisyum üzerine büyütülen filmler ise yansıma optik ölçümlerinde kullanılmıştır. Alttaşlar kimyasal olarak temizlendikten sonra alttaş tutucuya yerleştirilerek, yükleme odacığındaki transfer koluna takılır. Aynı anda iki vakum odacığı da turbo moleküler pompa ile pompalanır. Taban basınç düzeyinde iki odacığın basıncı eşitlenince, geçit vana açılarak transfer gerçekleştirilir. Alttaş tutucu sıcaklığı 200°C'de sabitlenince gaz karışımı akıtmaya başlanır. İstenilen toplam basıncında deney yapılabilmesi için uyarlamalı basınç sabitleyici kelebek vana kontrolcüsü (adaptive pressure controller throttle valve) kullanılmıştır. Toplam basınç 400 mTorr'a sabitlenince RF

gücü uygulanmıştır. RF gücünün uygulanmaya başlanması, ince film üretiminin başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.1'de PECVD sisteminin şeması verilmiştir.

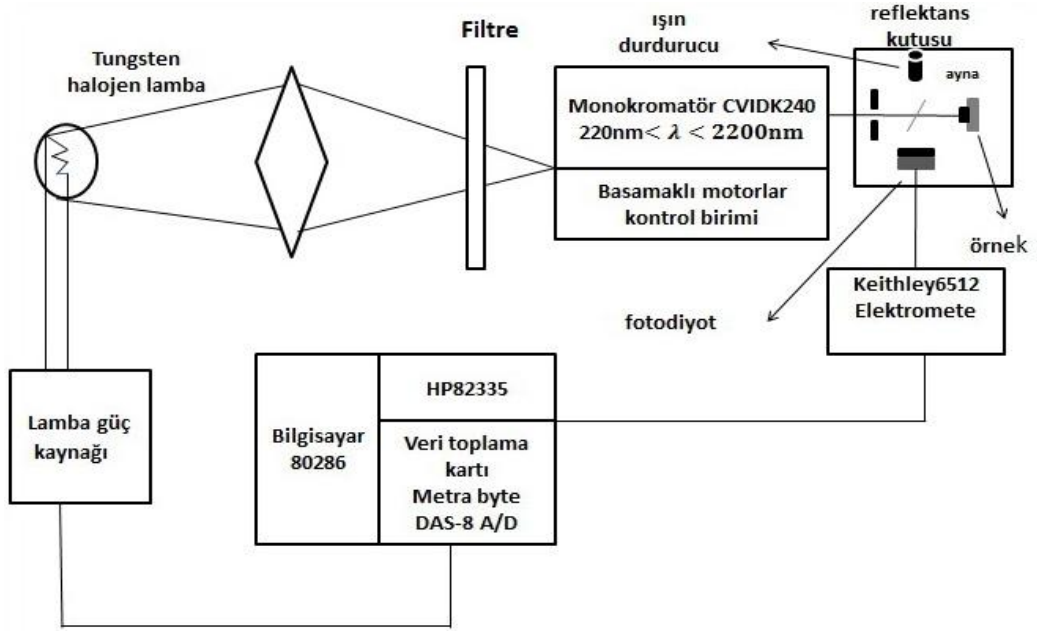


Şekil 3.1. PECVD sistemi

3.2 Yansıma Ölçüm Düzeneği

Yaptığımız örneklerin yansıma miktarlarını belirlemek için, optik yansıma ölçümleri yapılmıştır. Yansıma deney düzeneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bir DC güç kaynağı ile kuartz-halojen lambaya sabit akım sürülür ve kuartz-halojen lambanın aydınlatma şiddeti DC güç kaynağının bağlı olduğu bilgisayarla kontrol edilir. CVI Digikrom 240 monokromatör yardımıyla istenilen dalgaboyunda ışık elde edilir. 400-1100 nm dalgaboyu aralığındaki fotonları dedekte etmek için BPW34 (pin yapıda Si), daha uzun dalgaboyları için pin yapıda Ge fotodiyot kullanılmıştır. Yansıma kutusu, deneysel çalışmalar sırasında tasarlanmıştır. Yansıma kutusuna gelen monokromatik ışık yarı geçirgen aynadan geçip örneğin yüzeyine düşer ve geri yansıyıp yine yarı geçirgen aynaya düşerek ve oradan yansıyarak dedektöre gelir. Dedektörden Keithley 6512 elektrometre ile ölçülen kısa devre akımı bilgisayara aktarılır. Dalgaboyu 400–1600 nm spektral aralığında, 2 nm adımlarla

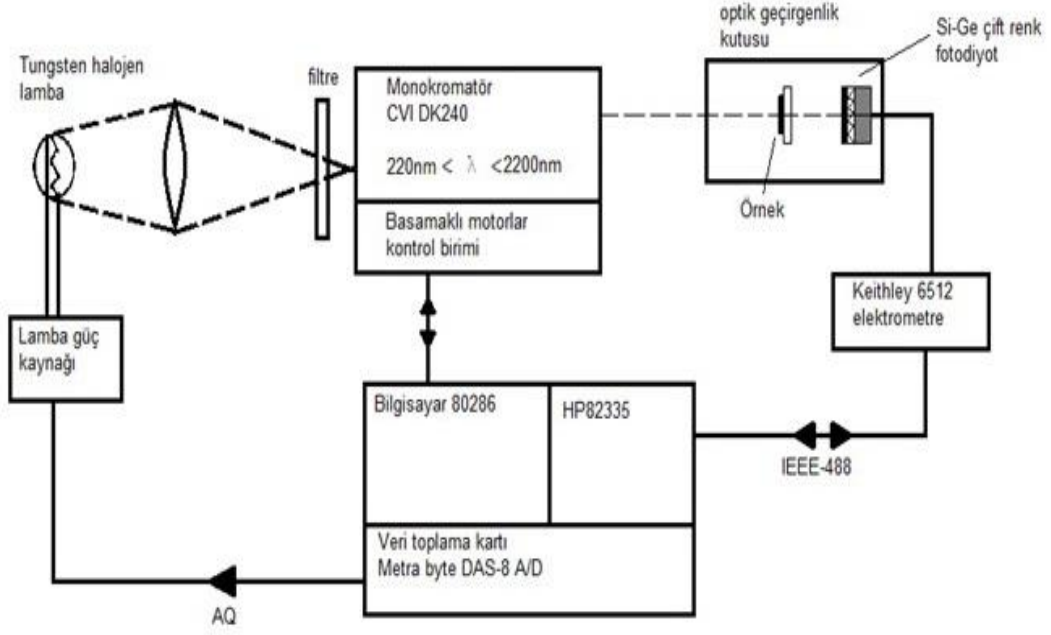
değiştirilerek bilgisayara aktarılmış ve bir dosyaya yazdırılmıştır. Aynı deneysel koşullarda referans yansıtıcı olarak alüminyum aynanın reflektansı da ölçülmüştür. Daha önceden alüminyumun spektral yansıma karakteristiği bilgisayara yüklendiğinden, örneğin optik yansıması hesaplanır ve dosyaya yazdırılır.



Şekil 3.2. Yansıma ölçüm düzeneği şeması

3.3 Optik Geçirgenlik Deneyi

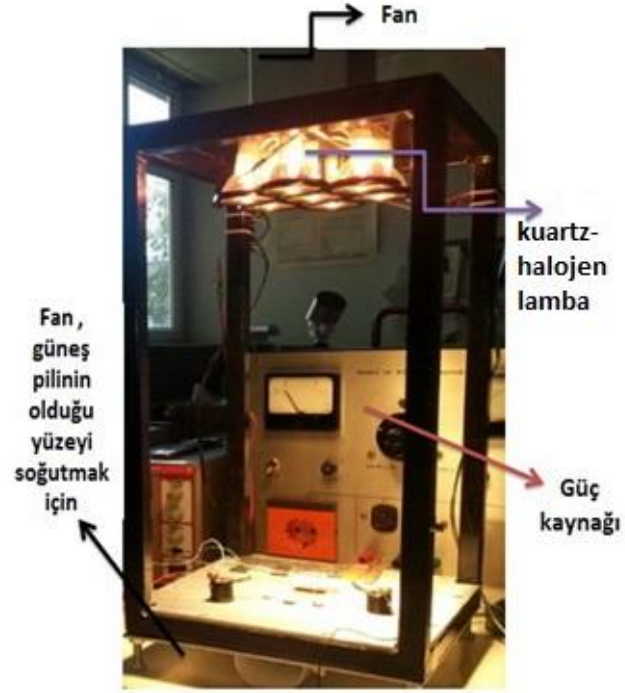
Optik geçirgenlik deney düzeneği Şekil 3.3.'te, görülmektedir. Optik geçirgenlik deneyinde aynı reflektans deneyi gibi çalışıyor. Bu deneyde ilk başta örnek yokken dedektör üzerine düşen ışığın oluşturduğu kısa devre akımı (I_0), dalga boyuna bağlı olarak kaydedildi. Daha sonra dedektörün önünde örnek varken aynı konumdaki dedektörün ürettiği kısa devre akımı (I) kendisi alındı. Yaptığımız yansıma önleyici kaplamaların optik geçirgenlik miktarını, kısa devre akımların oranı ($\frac{I}{I_0}$) belirliyor. Optik geçirgenlik verisi kullanılarak kalınlıklar bulundu ve örneğin kırma indisinin dalga boyuna bağıllığı hesaplandı.



Şekil 3.3. Optik geçirgenlik ölçüm düzeneği şeması

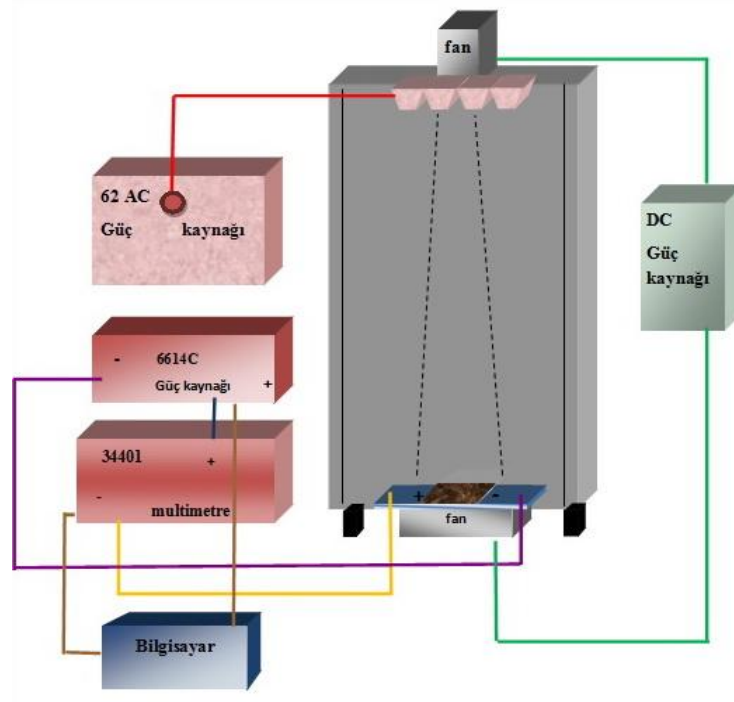
3.4 Akım-Gerilim Ölçümleri

Yansıtma kaplama yapılmasının güneş gözesinin performansına etkisinin tam olarak anlaşılması için akım-gerilim (IV) ölçümleri yapılmalıdır. Laboratuvarımızda kurulu bulunan, kuartz –halojen lambalardan oluşan bir güneş benzetimleyicisinin ürettiği 100 mW/cm^2 şiddetindeki aydınlatma altında IV ölçümleri yapılmıştır. Güneş benzetimleyicisi, önceki yıllarda verilen bir mezuniyet projesinde tasarlanmış ve üretilmiştir. Işık şiddeti, her ölçüm öncesinde standart fotodiyot ile ölçülerek istenilen ışık şiddeti ayarlanabilmektedir. Aynı zamanda ölçüm süresince güneş gözesinin ısınmaması için örneklerin yerleştirildiği tabla, dinamik hava soğutması ile soğutulmaktadır. Aydınlatma için, 12 V ve 50 W'lık, çift renkli yansıtıcısı olan, seri bağlı yedi adet kuartz halojen lamba kullanılmıştır. Hem lambaların ömrünün uzun olması ve kararlılığı için, benzetimleyicinin üstündeki bir fan ile soğutulmaktadır. Şekil 3.4'te, kullanılan güneş benzetimleyicisinin bir resmi verilmiştir.



Şekil 3.4. Aydınlatma altında IV ölçümlerinde kullanılan güneş benzetimleyicisi.

IV deneyleri, bilgisayar kontrollü güç kaynağı (Agilent 6614) ile ayarlanan gerilme karşılık, yine bilgisayar kontrollü multimetre (Agilent 34401) ile göze akımının ölçülmesi ile yapılmıştır. Şekil 3.5'te IV ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5. I-V ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.

3.5 Tayfsal Duyarlılık Ölçümleri

Tayfsal duyarlılık, birim aydınlatma güç yoğunluğuna bağlı olarak kontaklardan toplanan akımdır. Tayfsal duyarlılık ölçümlerinde, monokromatik güç yoğunluğunun belirlenmesinde bir referans fotodiyot kullanılır. Referans fotodiyotun kısa devre akımı ve tayfsal duyarlılığı kullanarak, gelen optik güç yoğunluğu hesaplanır. Daha sonra referans diyotla aynı konuma yerleştirilen güneş gözesinin kısa devre akımı ölçülerek tayfsal duyarlılığı bulunur. Burada diğer tüm parametreler aynı kaldığından, güneş gözesinin tayfsal duyarlılığı basit bir doğru orantıya dönüşür:

$$SR = \frac{I_{GP}}{I_D} \times SR_D \quad (3.1)$$

Burada SR ve SR_D , sırasıyla güneş gözesinin ve referans fotodiyotun tayfsal duyarlılığını, I_{GP} ve I_D , sırasıyla güneş gözesinin ve referans fotodiyotun kısa devre akımlarını göstermektedir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında; PECVD yöntemiyle kristal silisyum ve cam üzerine üretilecek hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tabanlı yansıtma kaplamaların üretilmesi hedeflenmiştir. Tek katman ya da çift katman yansıtma kaplamaların üretiminde kaplama kalınlığı oldukça hassas ayarlanmalıdır. Laboratuvarımızda kurulu bulunan PECVD sisteminde kaplama kalınlığını deney süresince ölçmek teknik olarak mümkün olmadığından, film üretim hızı, farklı deney sürelerinde üretilmiş ince film örneklerden hesaplanabileceği öngörülmüştür. Kaplama malzemesi olarak kullanılabilmesi için uygun optik parametrelere (kırma indisi, soğurma katsayısı vb.) sahip $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ örneklerin üretildiği deneysel hazırlama koşulları (Gaz karışım oranları, RF gücü, alttaş sıcaklığı vb.) belirlenmiştir. Daha sonra hazırlama koşulları sabitlenerek farklı deney sürelerinde, bir seri $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve bir seri $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ ince film örnekler, kristal silisyum ve cam alttabanlar üzerine üretilmiştir. Burada ince filmin alttaban üzerine birikme hızının deneyin başından sonuna kadar aynı olduğu ve üretilen kaplamanın atomik konsantrasyon bakımından homojen olduğu kabul edilmiştir.

Yansıtma kaplamaların üretiminde alttaban olarak, öz direnci $1\text{--}30\ \Omega\cdot\text{cm}$ ve kristal yönelimi (100) olan tek kristal silisyum ve Corning 1737F cam malzemeler kullanılmıştır. Alttaşlar bir maske yardımıyla alttaş tutucuya bağlandıktan sonra, yükleme odacığına (load lock) yerleştirilir. Film büyütme odası ile yükleme odacığı, geçit vana ile birbirinden yalıtılmıştır. İki odacık da Turbo Moleküler Pompa ile taban basınç düzeyi olan 1×10^{-5} Torr'a kadar pompalandıktan sonra geçit vana açılır ve transfer kolu yardımıyla, alttaş tutucu, anoda yerleştirilir ve anot ısıtılmaya başlanır. Anot sıcaklığı tüm deneylerde $200\ ^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Anot $200\ ^\circ\text{C}$ 'de dengeye geldiğinde reaktöre akıtılmaya başlanır. $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ örneklerin üretiminde SiH_4 ve CO_2 $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ örneklerin üretiminde SiH_4 ve N_2 gaz karışımları kullanılmıştır. Tüm deneylerde toplam gaz akış hızı 10 sccm ve SiH_4 akış hızı 2 sccm olarak ayarlanmış ve kütle akış kontrolcülerini ile sabit tutulmuştur. Deney boyunca sabit hızla pompalama, turbo moleküler pompanın 400 Hz'de döndürülmesi ile sağlanmıştır. Reaktif gazlar, film büyütme odacığına girmeden önce karıştırılmış. Kapasitif manometre ile okunan reaktör basıncı, elektronik kontrollü kelebek vana (throttle gate valve) ile 400 mTorr değerine sabitlenmiştir.

Reaktör toplam basıncı dengeye geldiğinde RF gücü uygulanarak plazma elde edilir ve film üretimi başlamış olur. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H örneklerin üretiminde kullanılan RF gücü, sırasıyla 10 ve 12 W'tır. Örnek üretimi ise yine RF gücünün kapatılması ile sonlandırılır. Küme 1 ve Küme 2 örneklerinin üretilme koşulları Çizelge 1'de özetlenmiştir.

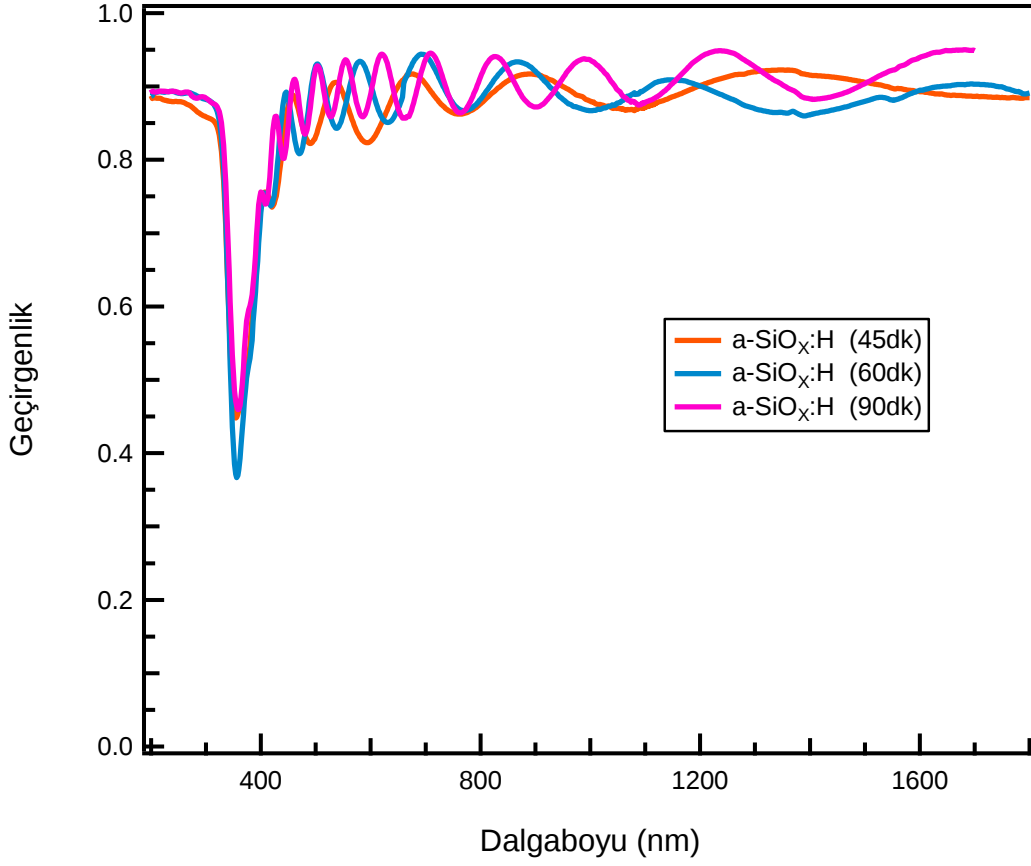
a-SiO_x:H için, seçilen hazırlama koşulları için kırma indisi fonksiyonu

$$n(\lambda) = a \frac{1}{\lambda^2} + n_{KA} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1. Örnek büyütme koşulları

Küme	Malzeme	RF Gücü (W)	Basınç (mTorr)	Alttaban Sıcaklığı (°C)	Turbo Pompa Hızı (Hz)	SiH ₄ Akış Hızı (sccm)	Toplam Gaz Akış Hızı (sccm)
1	a-SiO _x :H	10	400	200	400	2	10
2	a-SiN _x :H	12	400	200	400	2	10

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum altoksit (a-SiO_x:H) ince film örnekler (Küme 1), Çizelge 4.1'de verilen koşullarda, farkı sürelerde üretilmiştir. 45, 60 ve 90 dakika sürelerinde üretilen örneklerin kalınlıkları optik geçirgenlik deneylerinden belirlenmiştir. Şekil 4.1'de Küme 1 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumları verilmiştir. Çizelge 4.2'de ise örneklerin hesaplanan kalınlıkları verilmiştir.

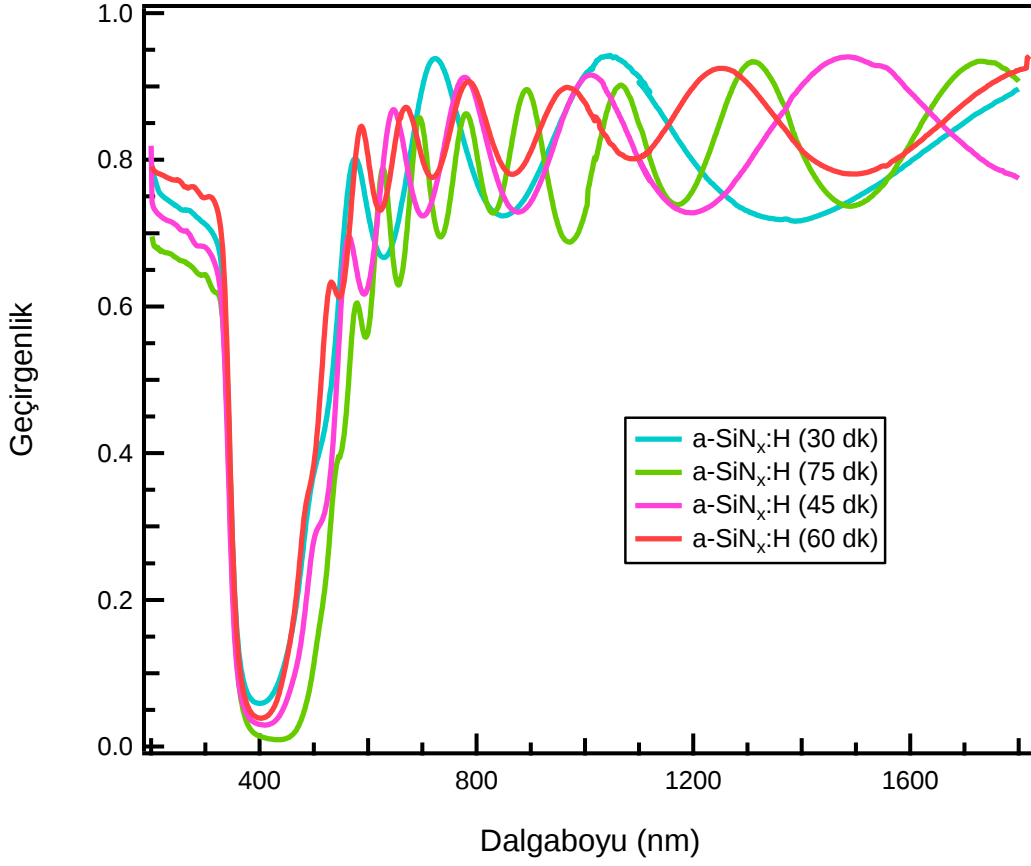


Şekil 4.1. a-SiO_x:H farklı zamanlarda geçirgenlik miktarı

Çizelge 4.2. Farklı sürelerde üretilmiş a-SiO_x:H örneklerin özellikleri

Örnek	Deney süresi (dk)	Film kalınlığı (nm)
1. a-SiO _x :H	45	581±10
2. a-SiO _x :H	60	802±10
3. a-SiO _x :H	90	1207±20

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum altnitrit (a-SiN_x:H) ince film örnekler (Küme 2) ise, Çizelge 4.1’de verilen koşullarda ve 30, 45, 60 ve 75 dakika deney sürelerinde üretilmiştir. Örneklerin kalınlıkları optik geçirgenlik deneylerinden belirlenmiştir. Şekil 4.2’de Küme 1 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumları verilmiştir. Çizelge 4.3’de ise örneklerin hesaplanan kalınlıkları verilmiştir.

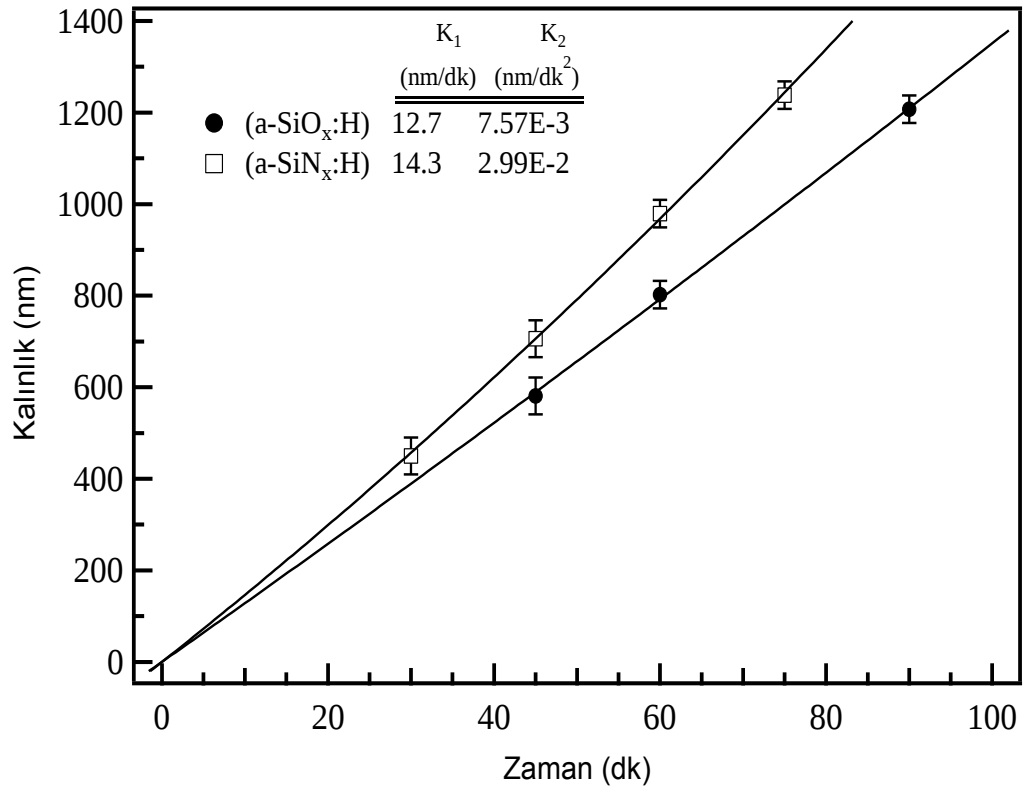


Şekil 4.2. a-SiN_x:H farklı zamanlarda geçirgenlik miktarı

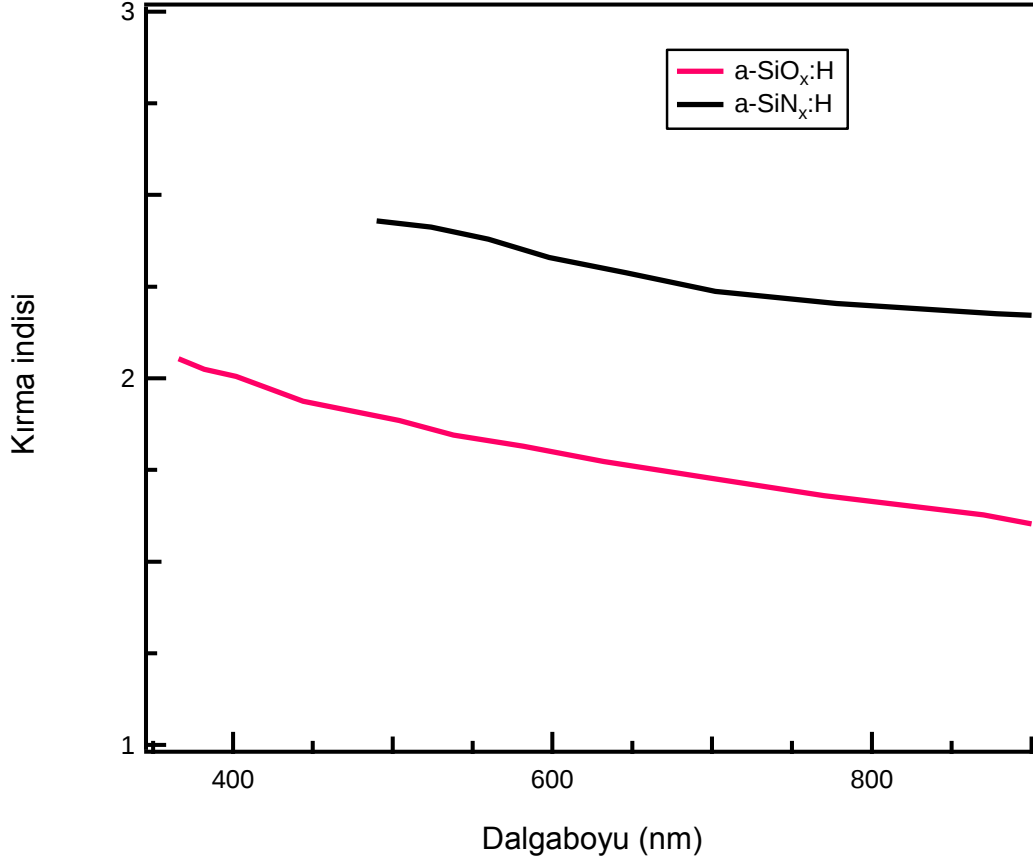
Çizelge 4.3. Farklı sürelerde üretilmiş a-SiN_x:H örneklerin özellikleri

Örnek	Deney süresi (dk)	Film kalınlığı (nm)
1. a-SiN _x :H	30	382±10
2. a-SiN _x :H	45	706±10
3. a-SiN _x :H	60	979±10
4. a-SiN _x :H	75	1238±20

a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince film örneklerin büyüme hızlarının belirlenmesi için örnek kalınlıkları üretim süresinin fonksiyonu olarak, Şekil 4.3'te çizilmiştir. Buradan, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H için kalınlıklar, sırasıyla, $12,7 t + (7,57 \times 10^{-3}) t^2$ ve $14,3 t + (2,99 \times 10^{-2}) t^2$ olarak bulunmaktadır. Ayrıca grafikten anlaşılabacağı üzere kalınlıklar, seçilen deney sürelerine için zayıf kuadratik bağlıdır. Şekil 4.4'te dalgaboyuna bağlı kırma indisi verilmiştir.



Şekil 4.3. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H örneklerinin kalınlıklarının deney süresi ile değişimi

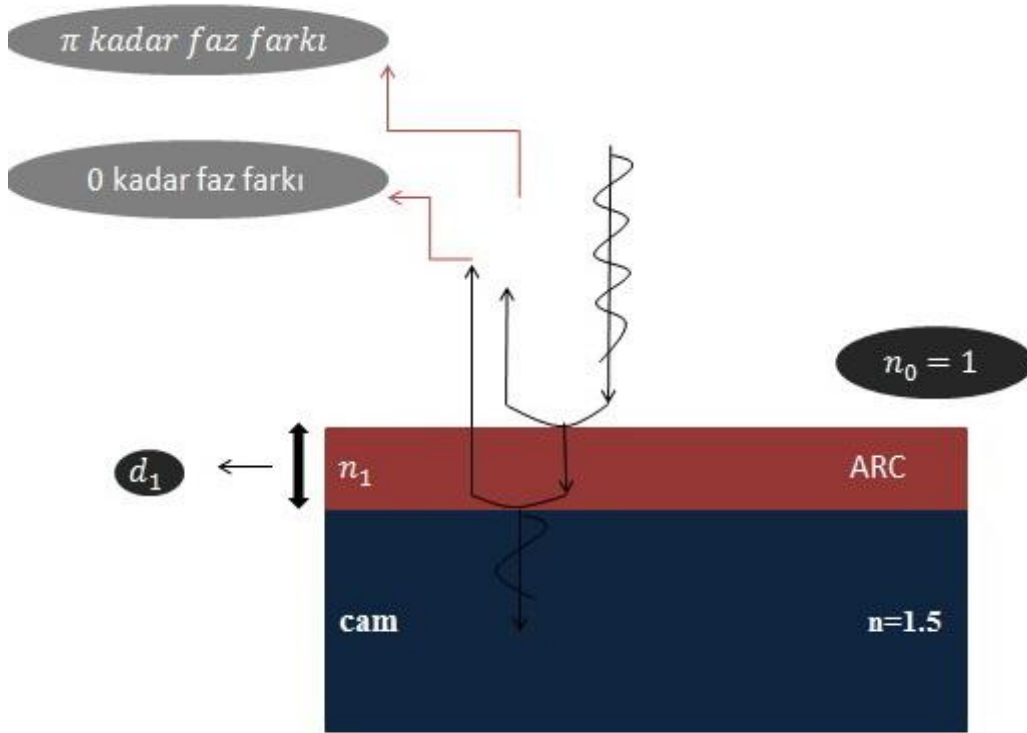


Şekil 4.4. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H örneklerin kırma indisinin dalgaboyuna bağılılığı

4.1 Tek Katmanlı Yansıma Önleyici Kaplamalar

Tez çalışmalarında, buraya kadar yapılan örnekler, ince film katmanların dalgaboyuna bağlı kırma indisi fonksiyonunun ve üretim hızlarının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Kaplama üretim hızları kullanılarak kristal silisyum ve cam üzerine tek katman birinci mertebe yansıma önleyici kaplama üretilebilir. AM1.5 G spektrumunun tepe dalgaboyu yaklaşık 550 nm olduğundan, ARC tasarımında bu dalgaboyu kullanılacaktır.

Çizelge 4.1'de verilen koşullarda üretilen a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince filmlerin, 550 nm için kırma indisleri, cam alttabanın kırma indisinden büyük ve kristal silisyumun kırma indisinden ise küçüktür. Bu nedenle arayüzeylerden yansılarda faz ilişkilerine gelecek katkı iyi düşünülmelidir. Şekil 4.5'te, cam üzerine üretilecek daha büyük kırma indisli ARC için yansımalar verilmiştir.



Şekil 4.5. Cam üzerinde tek katmanlı yansıma önleyici kaplama

Burada hava-film ve film-alttaş arayüzeylerinden yansımalar arasında, 0° geliş açısı için, faz farkı, δ ,

$$\delta = k \times 2d_K + \pi \quad (4.2)$$

ile verilir. Burada k , dalgasayısı, d_K ise kaplama kalınlığıdır. Minimum yansıma için $\delta = (2m+1)\pi$ olmalıdır. Buradan d_K , kaplamanın kırma indisi ve ışığın boşluktaki dalgaboyu, λ_0 cinsinden,

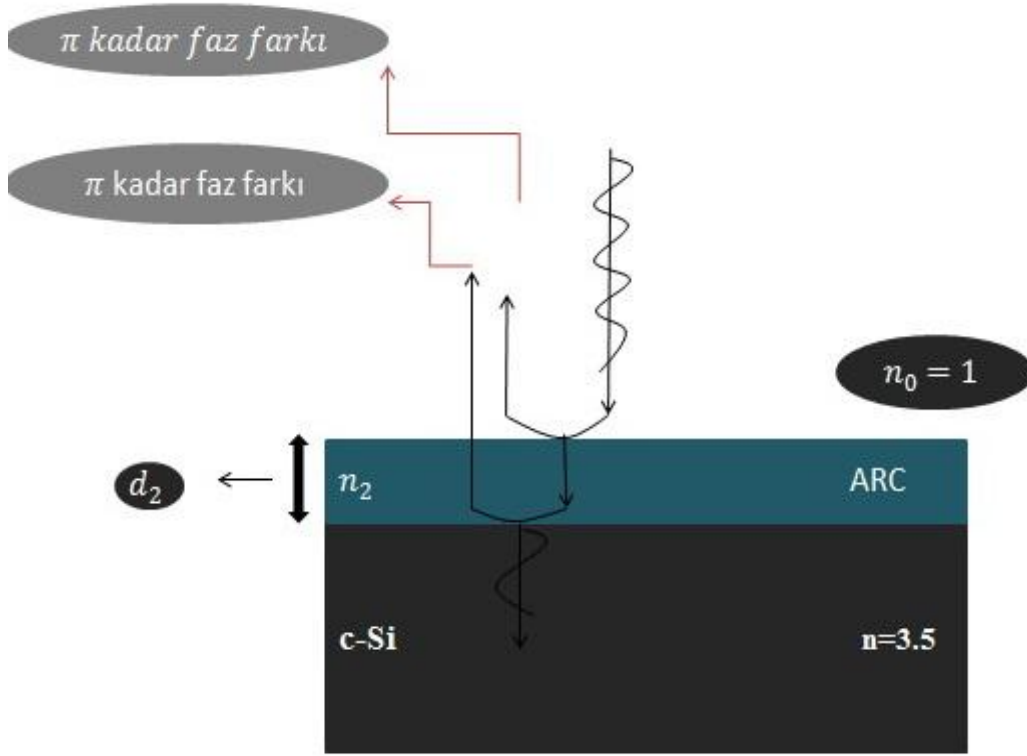
$$d_K = \frac{\lambda_0}{2n_K} \quad (4.3)$$

bulunur.

Eğer alttaban kristal silisyum seçilirse, kaplamanın kırma indisi daha küçük olduğundan, Eş.4.2'de verilen faz farkı ifadesine π katkısı gelmez. Bu durumda kaplama kalınlığı ile dalgaboyu, λ_0 , arasındaki ilişki,

$$d_K = \frac{\lambda_0}{4n_K} \quad (4.4)$$

ile verilir. Şekil 4.6'da kristal silisyum üzerinden yansımalar verilmiştir.

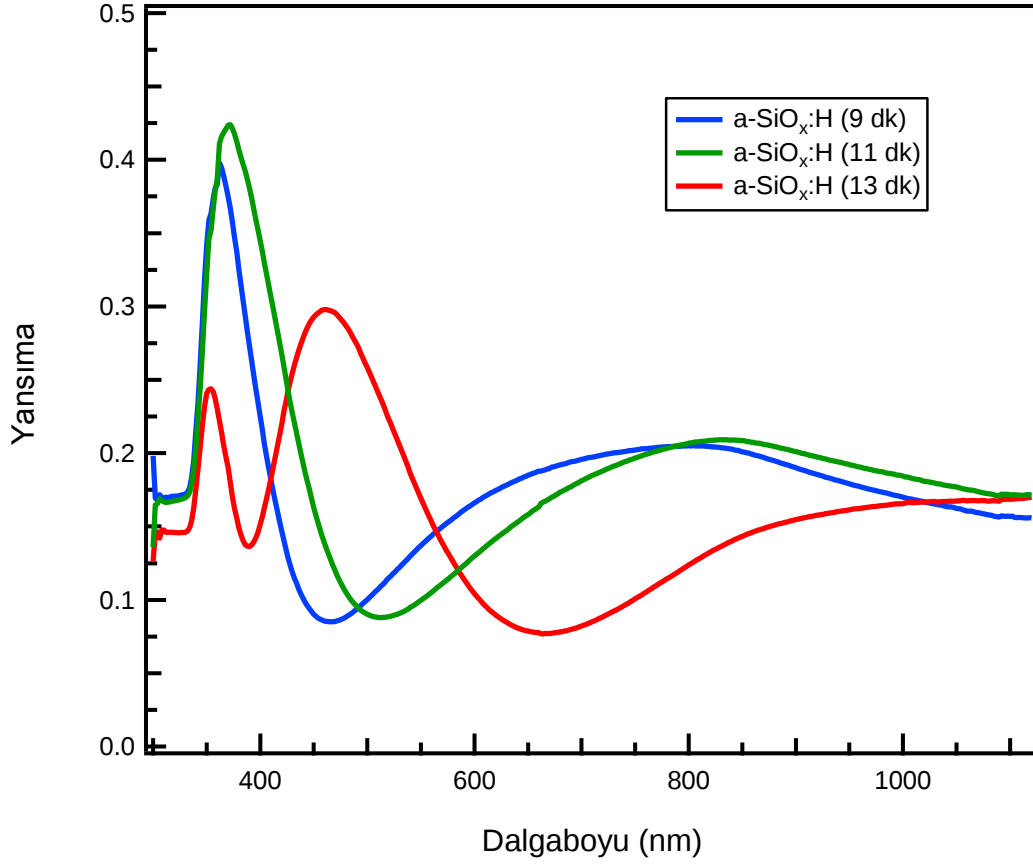


Şekil 4.6. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı yansıma önleyici kaplama

4.2 a-SiO_x:H Tek Katmanlı Yansıtma Kaplamaların Üretilmesi

Eş.4.3 ve 4.4'te verilen tek katman ARC kalınlıklarına ulaşabilmek için a-SiO_x:H'nin 550 nm için kırma indisi değeri Şekil 4.4'ten 1,83 olarak belirlenir. Gerekli kaplama kalınlıkları ise, a-SiO_x:H ince filmler üretilirken hesaplanan örnek kalınlığı Şekil 4.3'te verilen katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.7'da 9, 11 ve 13 dakika boyunca, cam alttaban üzerine üretilmiş örnekler için yansıma spektrumları verilmiştir. Çizelge 4.4'te ise minimum yansımanın gözlemlendiği dalgaboyu ve yansımaları verilmiştir.

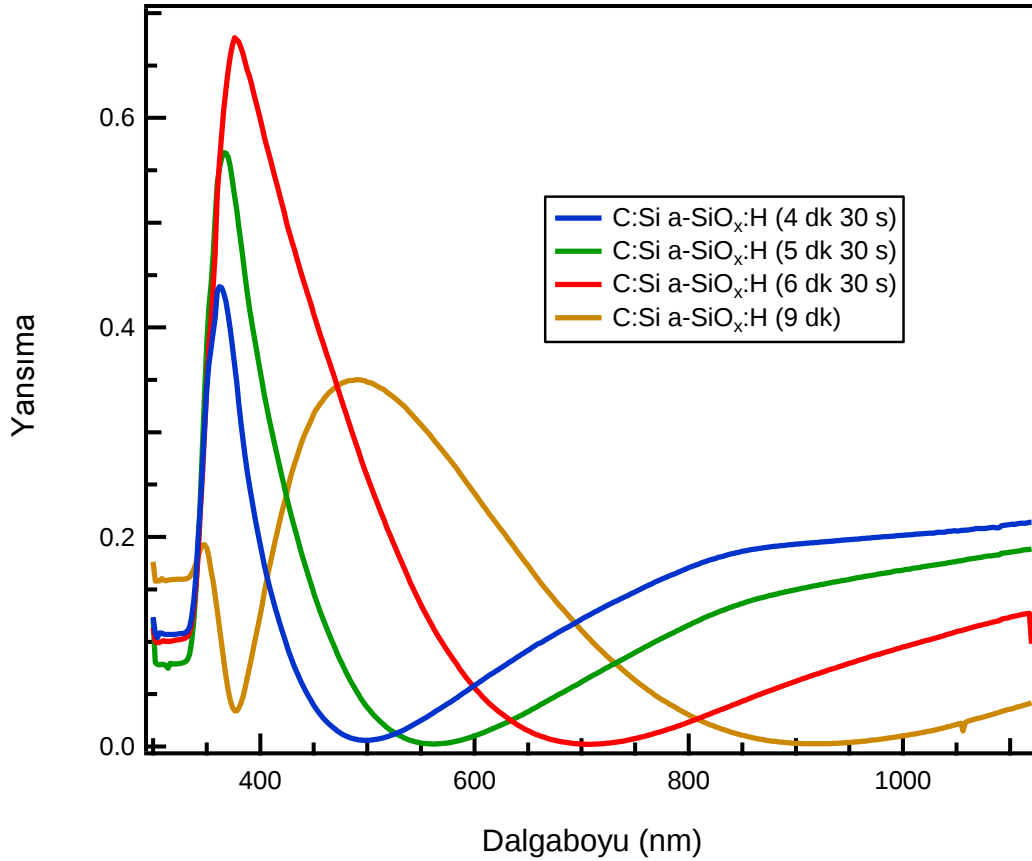


Şekil 4.7. Farklı zamanlarda cam üzerinde a-SiO_x:H kaplamanın yüzeyinden yansıma miktarı

Çizelge 4.4. Cam üzerinde tek katmanlı a-SiO_x:H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgaboylarda yansıma miktarı

a-SiO _x :H	λ (nm)	R (Cam)
a-SiO _x :H (9 dk)	466	0,084
a-SiO _x :H (11 dk)	512	0,087
a-SiO _x :H (13 dk)	662	0,076

Örnek üretim hızı aynı kabul edildiğinde, kristal silisyum üzerine üretilecek yansıtma kaplama için deney süresi hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de kristal silisyum üzerine üretilmiş, a-SiO_x:H kaplamalar için yansıma spektrumları verilmiştir. Çizelge 4.5’te ise minimum yansımanın gözlemlendiği dalgaboyu ve yansıma miktarları verilmiştir.



Şekil 4.8. a-SiO_x:H yansıma önleyici kaplamasının, kristal silisyum üzerine farklı zamanlarda yansıması

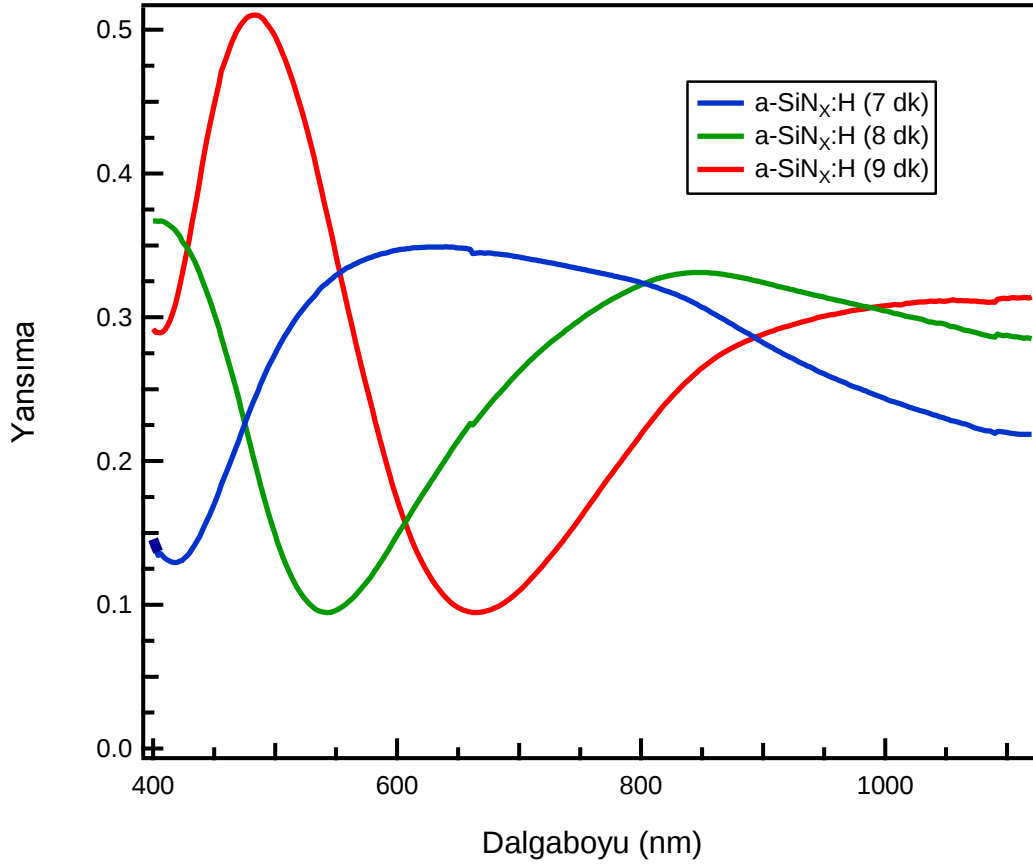
Çizelge 4.5. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı a-SiO_x:H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgaboylarda yansıma miktarı

a-SiO _x :H	λ (nm)	R (C-Si)
a-SiO _x :H (4 dk 30 s)	474	0.0135
a-SiO _x :H (5 dk 30 s)	562	0.0024
a-SiO _x :H (6 dk 30 s)	706	0.0021
a-SiO _x :H (9 dk)	916	0.0025

4.3 a-SiN_x:H Tek katmanlı Yansıtma Kaplamaların Üretilmesi

a-SiN_x:H kullanılarak üretilen yansıtma kaplamaların üretiminde, 550 nm için hesaplanan kırma indisi değeri 2,33 kullanılmıştır. a-SiN_x:H ince filmlerin kalınlığı deney süresine $14,3 t + (2,99 \times 10^{-2}) t^2$ bağlıdır.

Şekil 4.9'da 7, 8 ve 9 dakika boyunca, cam alttaban üzerine üretilmiş örnekler için yansıma spektrumları verilmiştir. Çizelge 4.6'da ise minimum yansımanın gözlemlendiği dalgaboyu ve yansımaları verilmiştir.

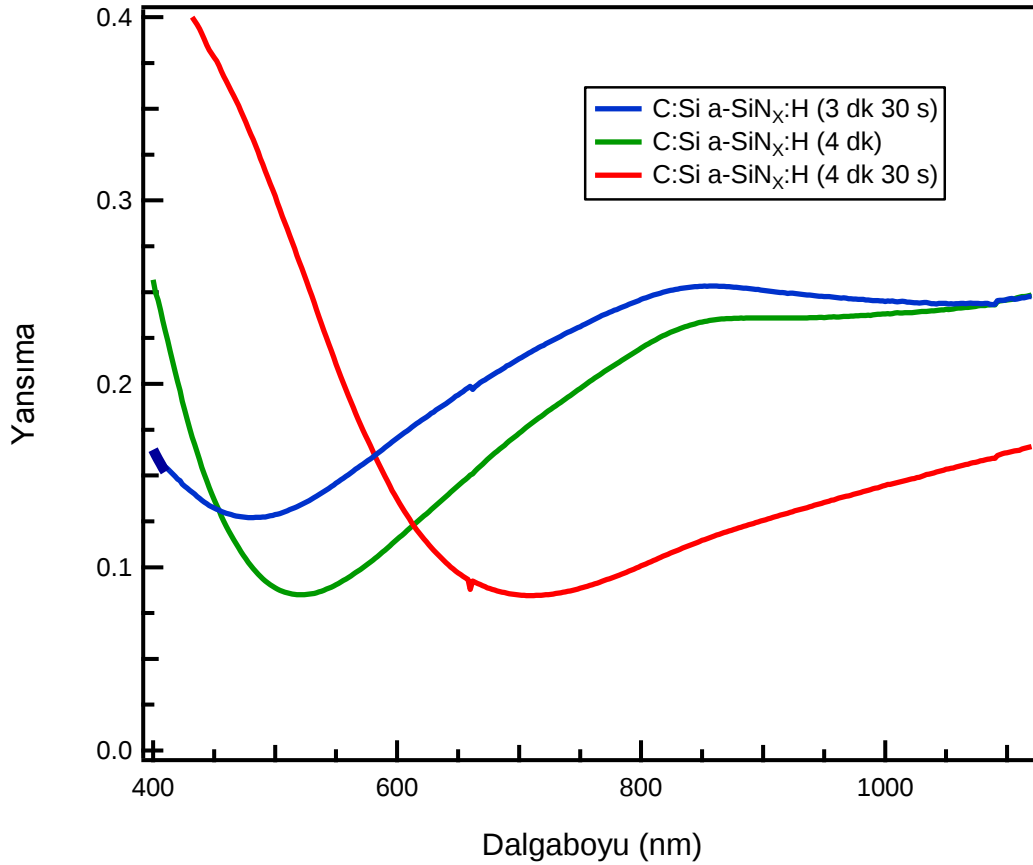


Şekil 4.9. Farklı zamanlarda cam üzerinde kaplanmış a-SiN_x:H kaplamanın yüzeyinden yansıma miktarı

Çizelge 4.6. Cam üzerinde tek katmanlı a-SiN_x:H yansıma önleyici kaplamanasının farklı dalgaboylarda yansıma miktarı

a-SiN _x :H	λ (nm)	R (Cam)
a-SiN _x :H (7 dk)	418	0.12
a-SiN _x :H (8 k)	542	0.094
a-SiN _x :H (9 dk)	664	0.094

Şekil 4.10'de kristal silisyum üzerine 3 dakika 30 saniye, 4 dakika ve 4dakika 30 saniye boyunca üretilmiş, a-SiN_x:H kaplamalar için yansıma spektrumları verilmiştir. Bu örneklerin üretiminde Çizelge 4.5'te ise minimum yansımanın gözleendiği dalgaboyu ve yansıma miktarları verilmiştir.



Şekil 4.10. a-SiN_x:H yansıma önleyici kaplamasının, kristal silisyum üzerine farklı zamanlarda yansıma miktarı

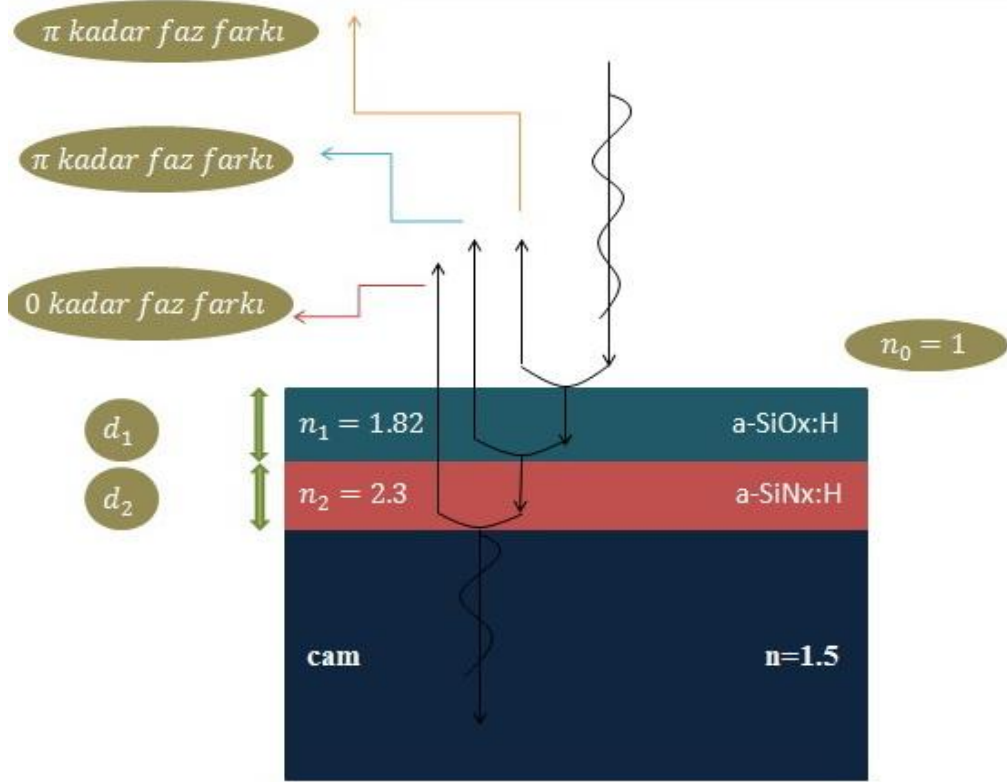
Çizelge 4.7. Kristal silisyum üzerinde tek katmanlı a-SiN_x:H yansıma önleyici kaplamasının farklı dalgaboylarda yansıma miktarı

a-SiN _x :H	λ (nm)	R (C-Si)
a-SiN _x :H (3 dk 30 s)	480	0.12
a-SiN _x :H (4 dk)	520	0.085
a-SiN _x :H (4 dk 30 s)	710	0.084

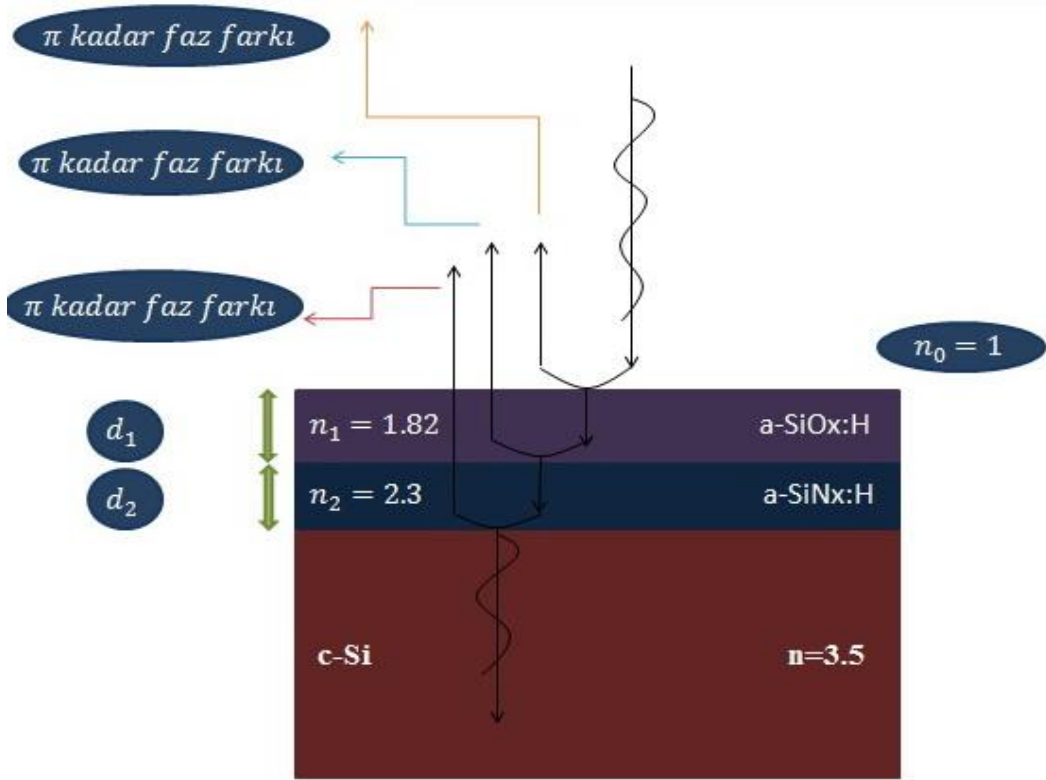
4.4 Çift Katman Yansıma Önleyici Kaplamalar

Tek katman yansıma önleyici kaplamaların yansıma spektrumu sonuçlarının alınmasından sonra, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince filmlerin bir arada kullanıldığı çift katmanlı yansıtma kaplamaların tasarlanmasına geçilmiştir. Cam ve tek kristal silisyum alttabanlar üzerine üretilecek kaplamaların kalınlıklarının belirlenmesinde, arayüzeylerden gerçekleşecek yansımaların faz ilişkileri yine önemlidir. Şekil 4.11 ve 4.12'de her bir arayüzeyden gerçekleşecek yansıma için faz değişimleri verilmiştir. Çift katman yansıtma kaplama için alt katman kırma indisi daha büyük

olan a-SiN_x:H, üst katman ise daha küçük kırma indisli a-SiO_x:H olarak seçilmiştir. Buna göre cam üzerine yapılacak a-SiN_x:H katmanının kalınlığı, d₂ ve a-SiO_x:H katmanının kalınlığı, d₁ birbirine eşit optik kalınlıkta olmalıdır: $d = \frac{\lambda_K}{4}$. Burada λ_K , ışığın kaplama içindeki dalgaboyudur. Öte yandan tek-kristal silisyum alttabanlar üzerine üretilecek çift katman yansıtma kaplama için a-SiN_x:H ve a-SiO_x:H için kaplama kalınlıkları ise, sırasıyla, $d_2 = \frac{\lambda_K}{2}$ ve $d_1 = \frac{\lambda_K}{4}$ olarak belirlenmiştir. Eğer alttaban cam ise çift katman yansıtma kaplama için a-SiN_x:H ve a-SiO_x:H için kaplama kalınlıkları, sırasıyla $d_2 = \frac{\lambda_K}{4}$ ve $d_1 = \frac{\lambda_K}{4}$ olarak belirlenecek.

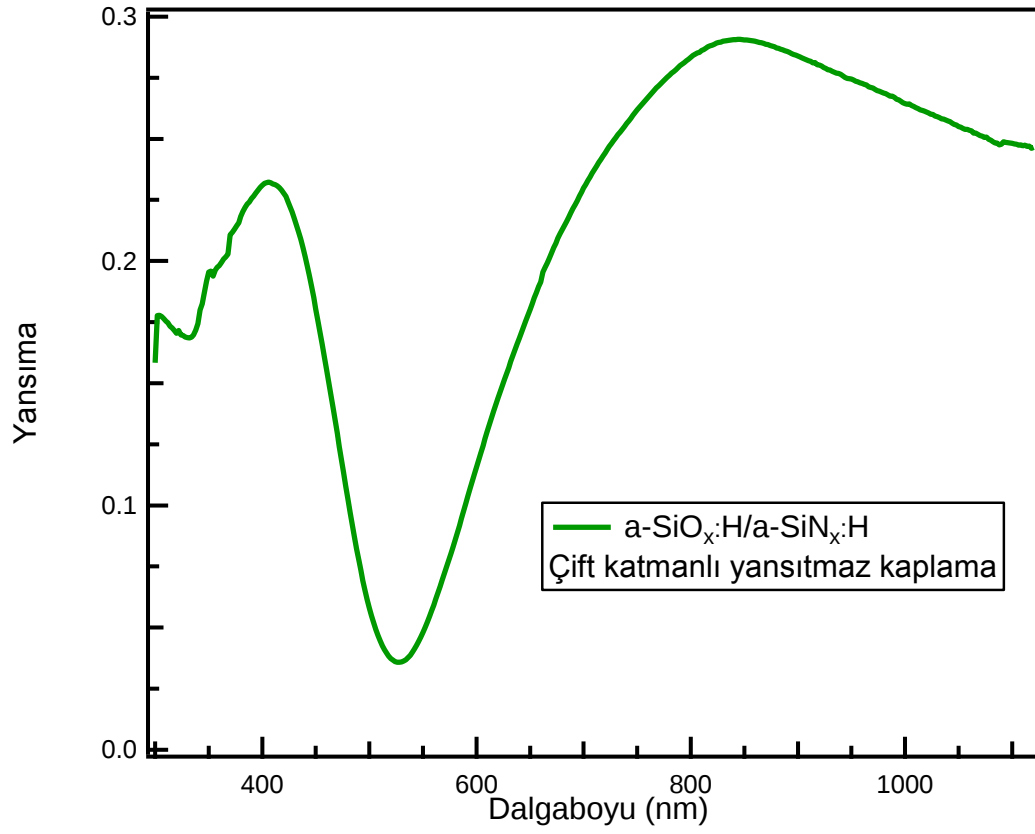


Şekil 4.11. Cam üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama



Şekil 4.12. Kristal silisyum üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

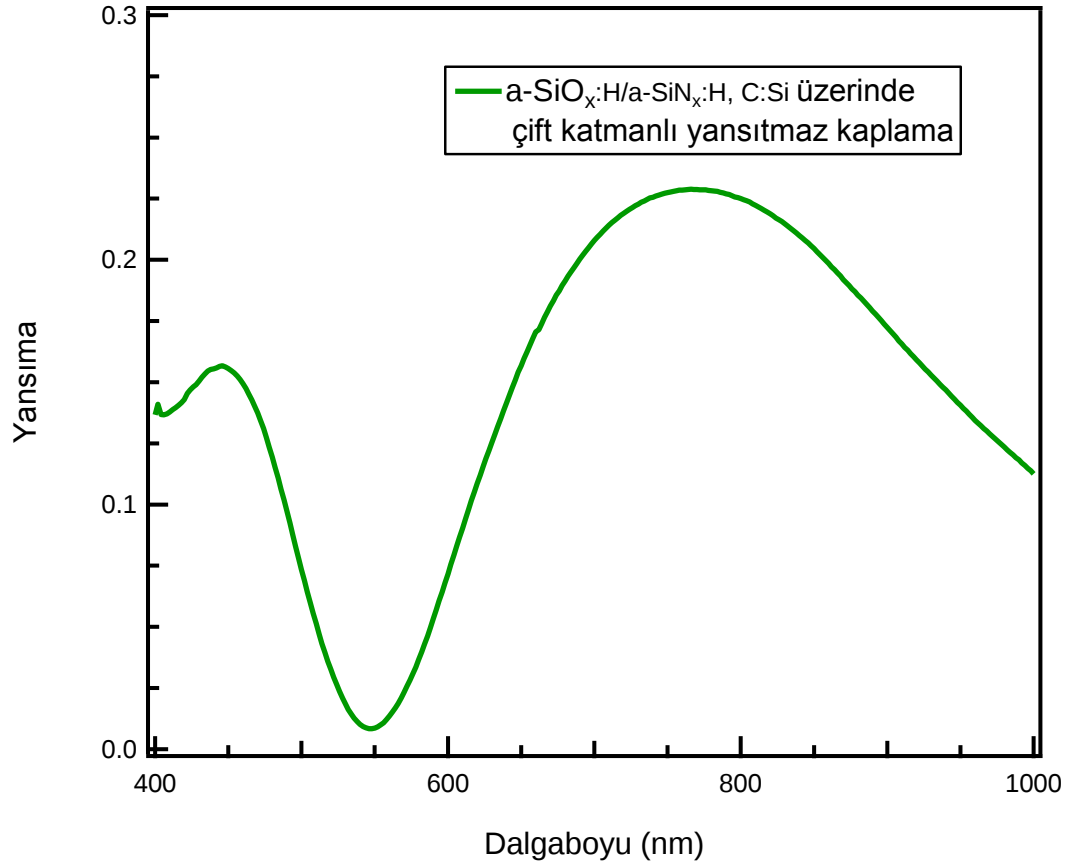
Şekil.4.13'te cam üzerinde çift katmanlı a-SiN_x:H/a-SiO_x:H yansıma önleyici kaplamanın yansıma spektrumu verilmiştir. Çizelge 4.8'de cam üzerine üretilen çift katman yansıtma kaplamanın, yaklaşık 528 nm'deki yansıtması 0,035 olarak ölçülmüştür. Şekil.4.14'te ise kristal silisyum üzerine üretilmiş çift katmanlı a-SiN_x:H/a-SiO_x:H yansıma önleyici kaplamanın yansıma spektrumu çizilmiştir. Çizelge 4.9'da Buna göre yaklaşık 548 nm'deki yansıma miktarı 0,0084 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.13. Cam üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

Çizelge 4.8. 528 nm de cam üzerinden, çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

a-SiN _x :H/a-SiO _x :H	λ (nm)	R (Cam)
a-SiN _x :H/a-SiO _x :H	528	0.035



Şekil 4.14. Kristal silisyum üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

Çizelge 4.9. 548nm de kristal silisyum üzerinde, çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

a-SiN _x :H/a-SiO _x :H	λ (nm)	R (C-Si)
a-SiN _x :H/a-SiO _x :H	548	0.0084

5. AMORF SİLİSYUM GÜNEŞ GÖZELERİ İÇİN YANSIMA ÖNLEYİCİ KAPLAMALAR

Tez çalışmasının bu aşamasında, ticari olarak satın alınan amorf silisyum tabanlı güneş gözelerinin verimini artırmak amacıyla yapılan yansıtma kaplamalara yer verilmiştir. Bu amaçla, $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ tek katman kaplama ile $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısındaki çift katman yansıtma kaplama tasarlanmıştır. Kaplamalar yapılmadan önce ve sonra, akım-gerilim ve tayfsal duyarlılık ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, doluluk oranı ve verim artışı çerçevesinde tartışılarak, bu güneş gözeleri için performans analizi yapılmıştır.

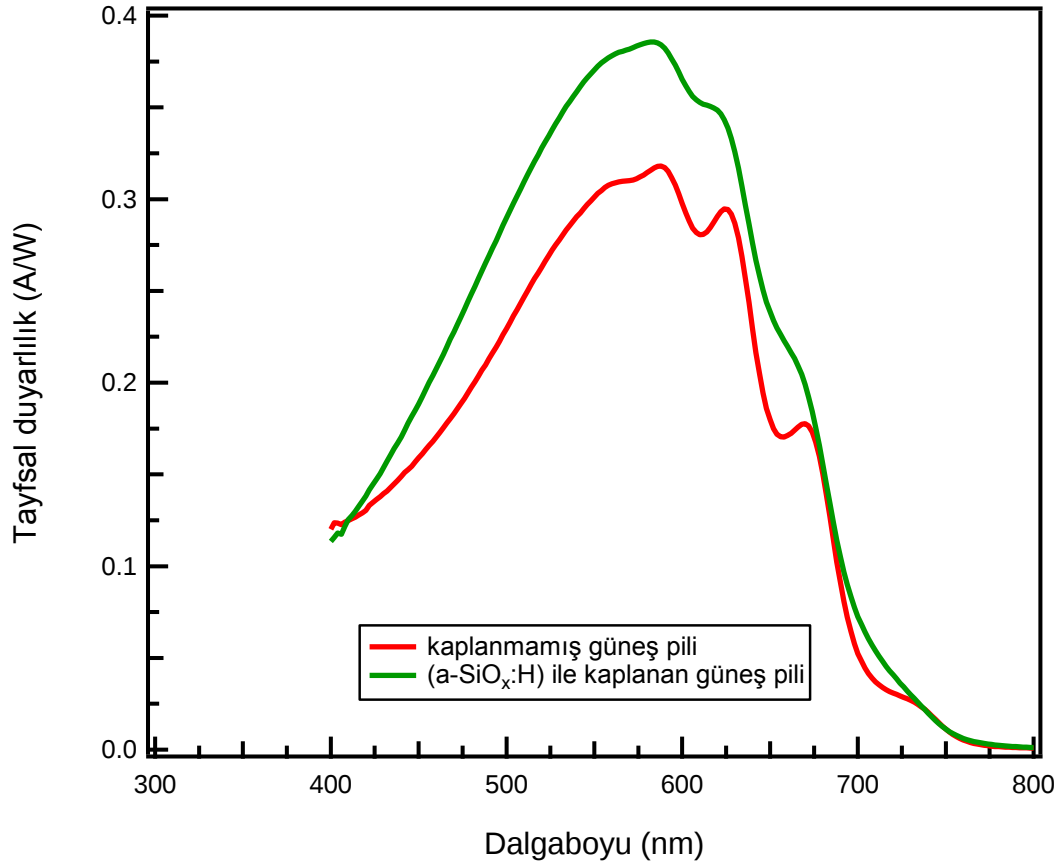
5.1 Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ İle Tek Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi

Bölüm 3'te üretim koşulları anlatılan $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama, amorf silisyum güneş gözesi için tekrarlanmıştır. Cam üzerine üretilmiş güneş gözeleri kullanıldığından, cam için yapılan kaplama tasarımı kullanılmıştır. Piyasadan bulunan güneş gözeleri genellikle tek bir aygıt olmayıp, birbirine seri bağlanmış gözelerden oluşur. Kısa devre akımı uyumsuzluğu gösterebileceği gerekçesiyle, satın alınan gözelerin arka kaplamaları aseton ile kaldırılarak kontaklar ortaya çıkartılmıştır. Her bir göze ayrı ayrı ölçülerek en iyi performans gösteren göze, yansıtma kaplama üretiminde kullanılmıştır. Kontaktların zarar görebileceği kaygısıyla, camın ön yüzeyinin kimyasal temizliğinde sadece aseton kullanılmıştır. Ayrıca seçilen aygıt yüzeyinin tamamının kaplanabilmesi için, alttaş tutucuya bağlanırken maske kullanılmamıştır. Böylece homojen kaplama yapılması sağlanmıştır.

5.1.1 Kaplama Öncesi Ve Kaplama Sonrasında Tayfsal Duyarlılık Ölçümleri

Şekil 5.1'de $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ tek katman yansıtma kaplama yapılan güneş gözesinin, kaplamadan önce ve sonra ölçülmüş tayfsal duyarlılık eğrileri verilmiştir. Kaplama yapılmadan önce, tayfsal duyarlılık yaklaşık 580 nm dalgaboyu için 32 A/W olarak ölçülmüştür. Yansıtma kaplama tasarımı, bu yüzden, AM 1,5 spektrumuna göre değil, tayfsal duyarlılığın en yüksek olduğu 580 nm için yapılmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi yaklaşık 585 nm dalgaboyunda 39 A/W'a kadar artmıştır. Bu oran yaklaşık % 22'ye karşılık gelmektedir. Bunun yanında tayfsal duyarlılığın 0,1 A/W'ın üzerinde olduğu dalga boyu aralığı 400 – 680 nm'dir. Yansıtma

kaplamanın yapılması ile bu aralık hemen hemen hiç değişmemiştir. Ancak aynı aralık için tayfsal duyarlılık genel olarak artmıştır.

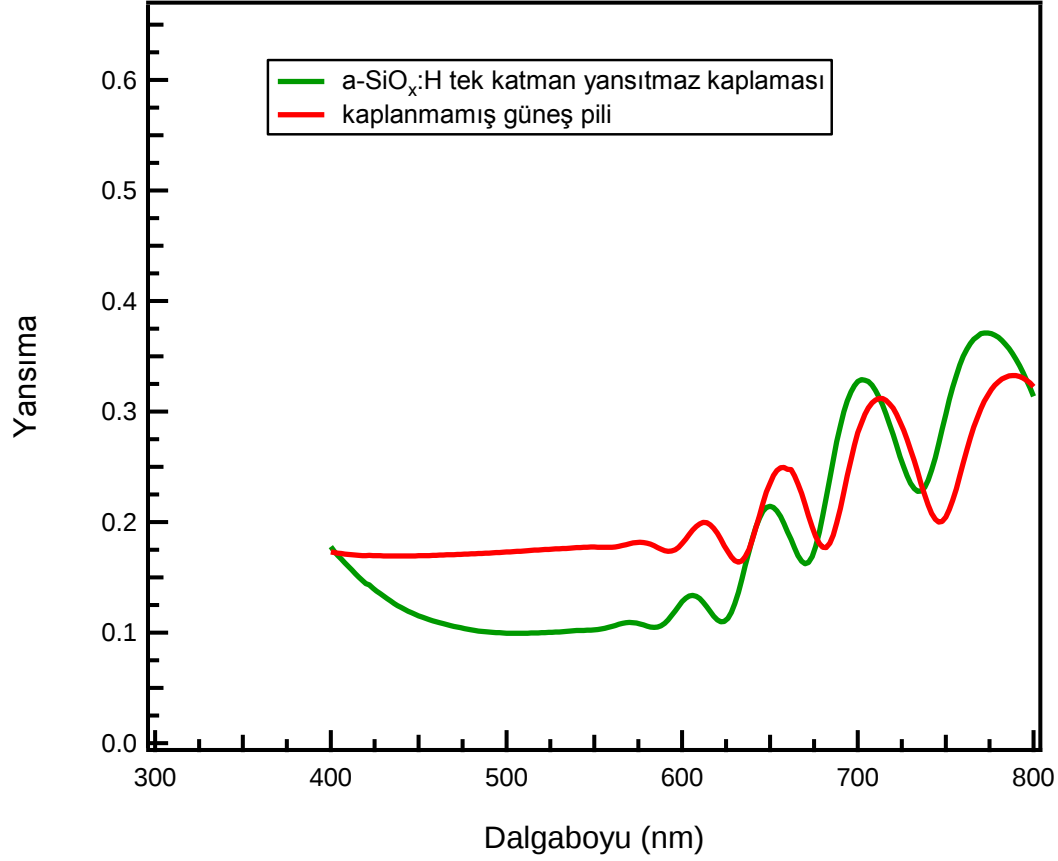


Şekil 5.1. Tek katman a-SiO_x:H yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için tayfsal duyarlılığın, dalgaboyuna bağlı değişimi.

5.1.2 Güneş Gözesinin Yansıtmasının Değişimi

Yansıtma kaplama tasarımının, tayfsal duyarlılığın en büyük değeri aldığı 585 nm için yapılması sonucunda tayfsal duyarlılıkta artış, güneş gözesinin yansıtmasının değişmesi bakımından da ele alınmalıdır. Bu amaçla yansıtma kaplama üretiminden önce ve sonra güneş gözesinin yansıtması ölçülmüştür. Şekil 5.2’de yansıtma spektrumları verilmiştir. Yansıtma kaplama sonucunda, dalgaboyu 585 nm için yansıtma 0,17’den 0,14’e düşmüştür. Kaplama ile yansıtmanın, kaplama öncesi duruma göre daha düşük değerler alması, yaklaşık 550–650 nm aralığında gerçekleşmiştir. Bu aralık bir güneş gözesinin en etkin çalışma aralığıdır. Yansıtmadaki azalmanın çok küçük olmasına karşın, Şekil 5.1.’den de görüldüğü gibi tayfsal duyarlılık önemli ölçüde artmıştır.

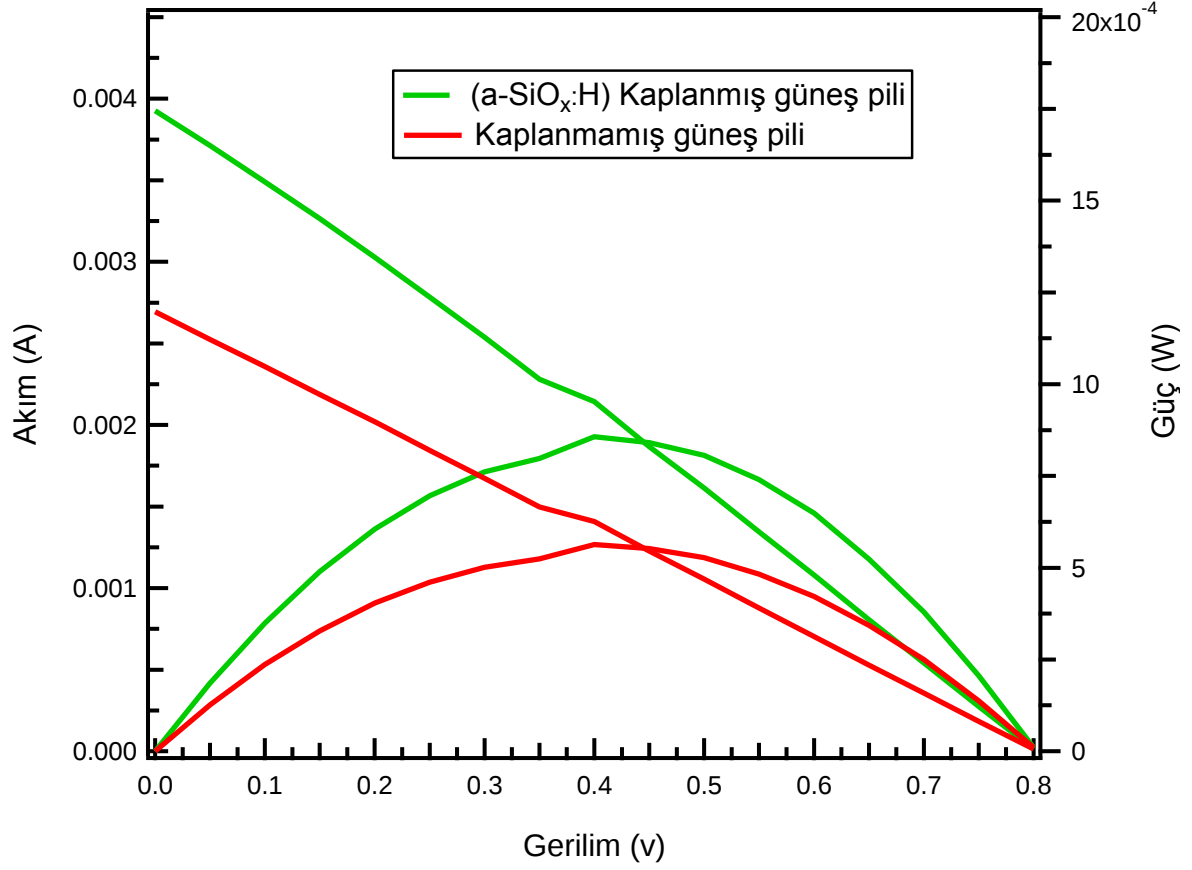
kaplama tasarımı AM 1,5 spektrumuna göre değil, güneş gözesinin tayfsal duyarlılığının en büyük olduğu dalgaboyu için tasarlanmasının doğru bir tercih olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 5.2. Tek katman a-SiO_x:H yansıtma verimliliği yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için yansıtmanın dalgaboyuna bağlı değişimi.

5.1.3 Akım-Gerilim Değişimi

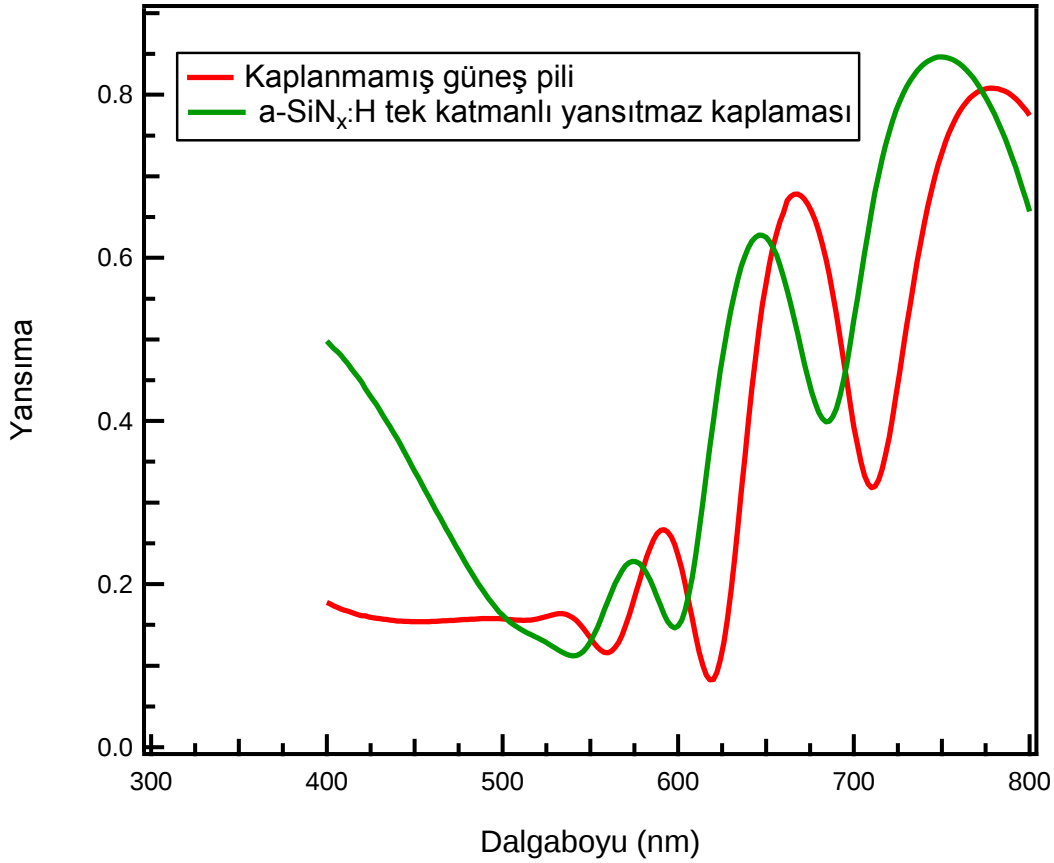
Tek katman a-SiO_x:H ile kaplanmış güneş gözesinin, kaplam öncesi ve sonrası IV grafiği ile, üretilen gücün gerilime bağlı değişimi grafiği Şekil 5.3'te verilmiştir. Kısa devre akımı 27×10^{-4} ten 4×10^{-3} A'e yükselmiştir. Buna karşın açık devre voltajı yaklaşık 0,8 V değerinde değişmez kalmıştır. Güneş gözesinin ürettiği güç ise 0,41 V için yaklaşık 0,5 W iken, yansıtma verimliliği ile 0,86'Wa yükselmiştir. Doluluk oranı ise 0,25'ten 0,28'e yükselmiştir. Buradan güneş gözesinin veriminin, 100 mW/cm² şiddetindeki kuartz halojen lamba aydınlatması altında % 0,5'ten % 0,9'a arttığı hesaplanmıştır. Bu sonuç, kaplamasız güneş gözesinin veriminin yaklaşık % 8 artırıldığını göstermektedir.



Şekil 5.3. Tek katman $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri.

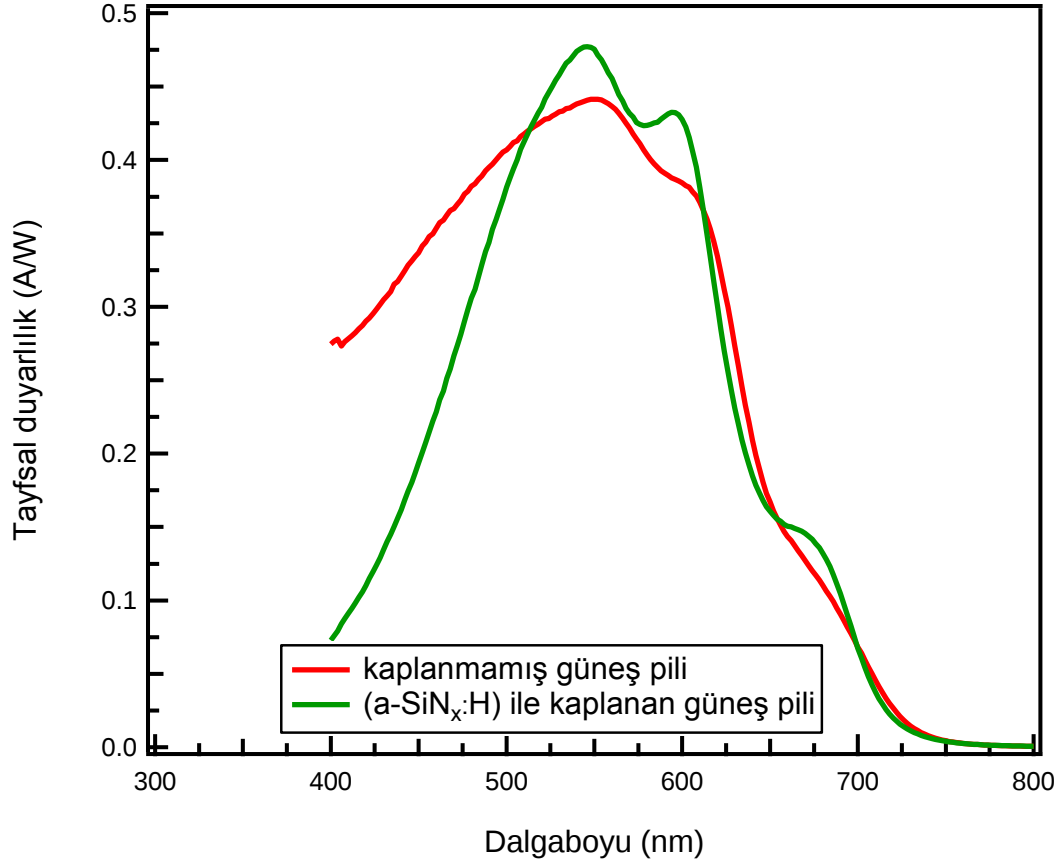
5.2 Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ İle Tek Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi

$a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ile üretilen tek katman yansıtma kaplamanın, amorf silisyum ince film güneş gözesinin performansına etkisinin incelenmesinden sonra, bir başka ince film güneş gözesi için, $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ tek katman yansıtma kaplama çalışması yapılmıştır. Tayfsal duyarlılık, yansıtma ve aydınlatma altında IV ölçümleri, yapılarak, $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplamanın performansa etkisi incelenmiştir. Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6'da sırasıyla, yansıma, tayfsal duyarlılık ve IV grafikleri, kaplama öncesi ve sonrası karşılaştırmalı olarak çizilmiştir.



Şekil 5.4. Tek katman a-SiN_x:H yansıtmaaz kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için yansıtmanın dalgaboyuna bağlı değişimi.

Yaklaşık 540 nm için gözenin yansıma miktarı 0,164'ten 0,112'e kadar azalmıştır. Öte yandan 500 nm'den kısa dalgaboylarında yansıma artmaktadır. Tayfsal duyarlılık, kaplama sonrasında 500–600 nm aralığında yükselmiştir. 540 nm'de 0,43'ten 0,47 A/W'a yükselmiştir. Ancak kısa dalgaboylarında yansımadaki artış, a-SiO_x:H kaplamalarda olduğunun aksine, tayfsal duyarlılığı önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma 400 nm için yarı yarıyadır.

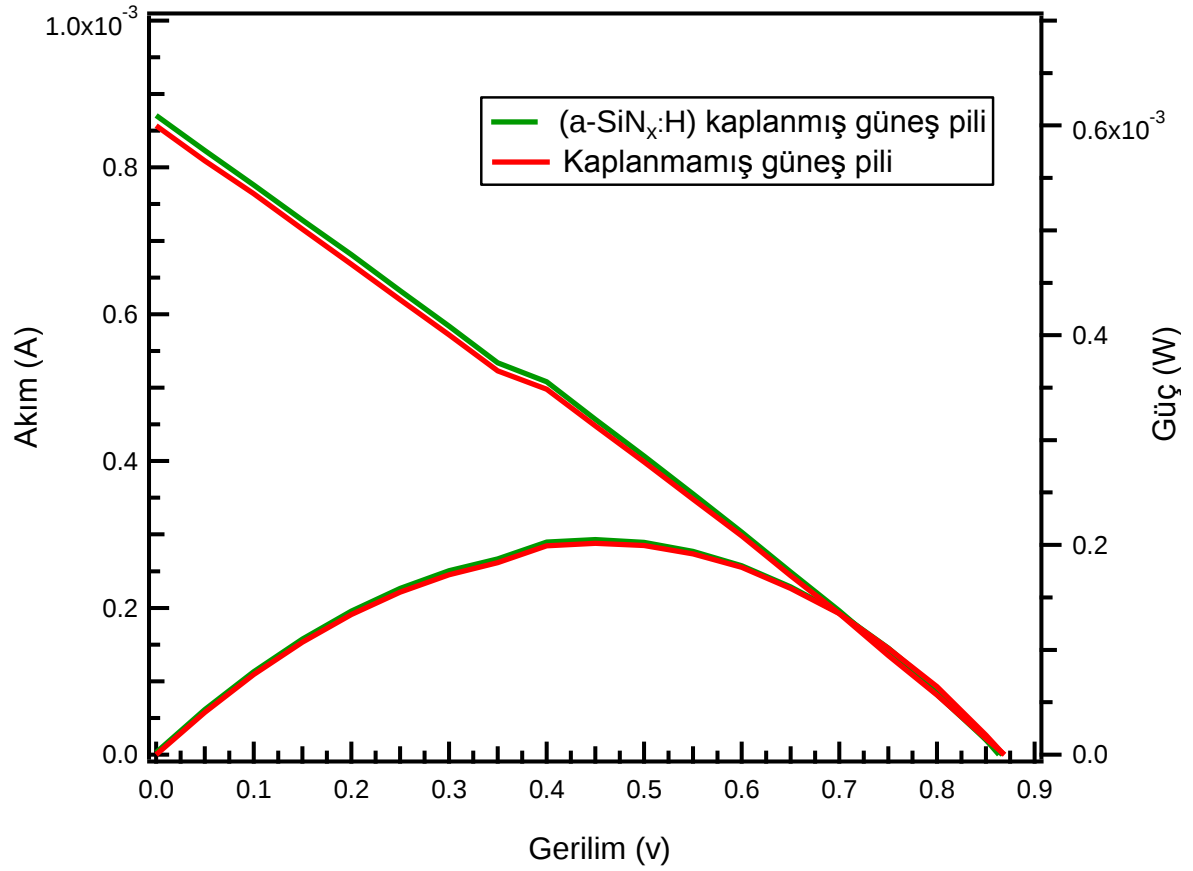


Şekil 5.5. Tek katman a-SiN_x:H yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için tayfsal duyarlılığın, dalgaboyuna bağlı değişimi.

a-SiN_x:H ile yansıtma kaplama yapılan güneş gözesinin, kısa devre akımı, kaplama sonucunda, 85×10^{-5} 'ten 87×10^{-5} A'e yükselmiştir. Ancak açık devre voltajı, 0,87 V değerinde hiç değişmeden kalmıştır. Doluluk oranı 0,25'ten sadece 0,26'ya çıkmıştır. Sonuç olarak, a-SiN_x:H ile yansıtma kaplamanın etkisiyle, verim 0,002'den 0,003'e kadar artmıştır.

a-SiN_x:H kaplamalar kullanılarak üretilen tek katman yansıtma kaplamaların performansının, a-SiO_x:H'e oranla düşük kalmasının en önemli nedeni kaplamanın optik soğurmasıdır. PECVD sisteminde üretilen a-SiN_x:H ince filmde, yapıya giren azot miktarı yeteri kadar çok olmadığından kırma indisi yeteri kadar küçültülememiştir. Dolayısıyla soğurma katsayısı yeterince küçülmemiştir. Reaktörde kullanılan N₂ gazının akış oranının 0,8 Sccm değerinden daha da artırılması, bir çözüm olarak görünse de, film büyüme hızı önemli ölçüde azalacaktır. a-SiN_x:H ince filmler kullanılarak tek katman yansıtma kaplamalar üretiminin PECVD sisteminde gerçekleştirilebilmesi için, kırma indisinin (ve

soğurma katsayısının) küçük tutulabildiği ancak film üretilme hızının büyük olduğu bir başka, üretim rejimi önerilmelidir.

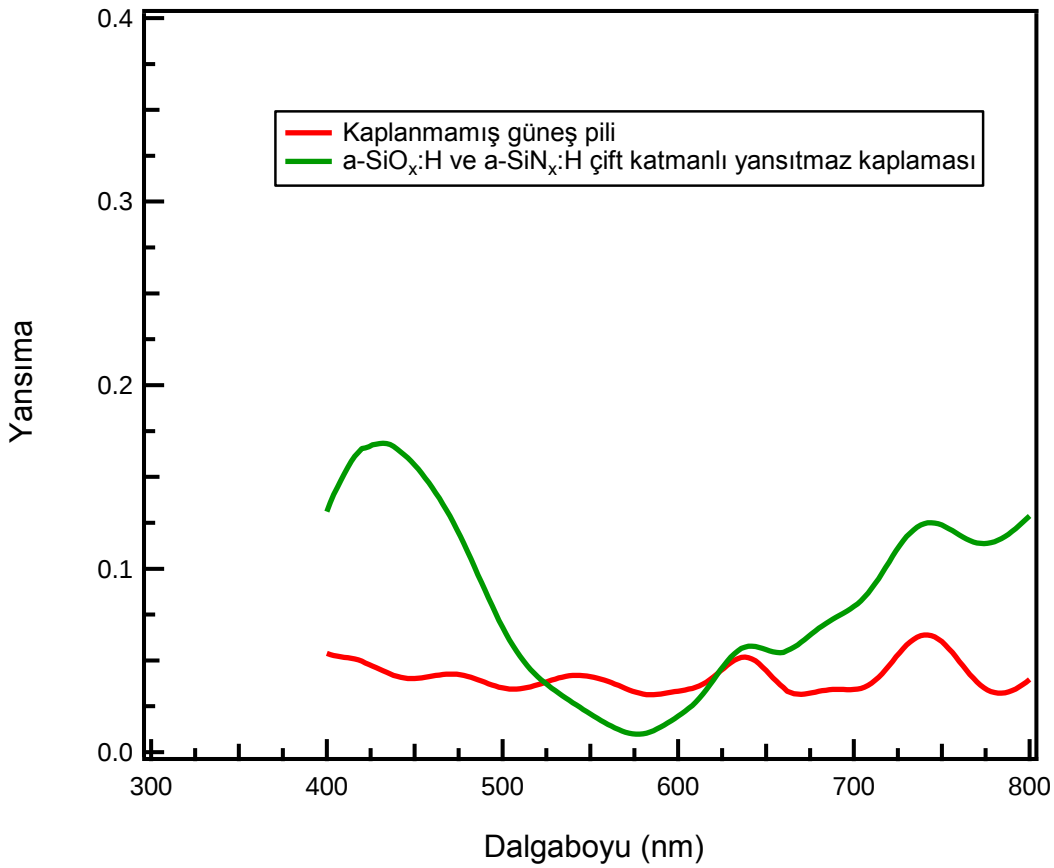


Şekil 5.6. Tek katman $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri.

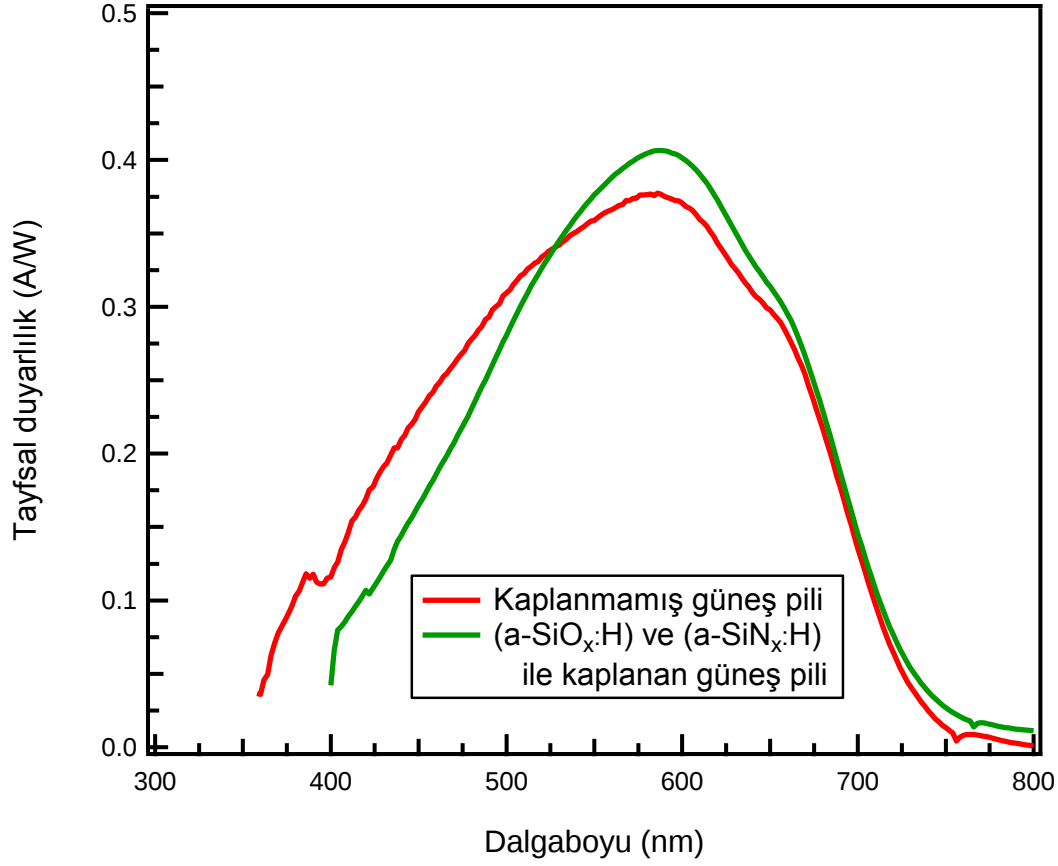
5.3 Amorf Silisyum Güneş Gözesi İçin Üzerinde, $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ Yapısında Çift Katmanlı Yansıtma Kaplama Üretimi

Tek katman $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve tek katman $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yansıtma kaplamaların, piyasadan elde edilen ince film güneş gözelerinin performansına etkisinin incelenmesinin ardından, bir başka göze için çift katman yansıtma kaplama tasarımı yapılmıştır. Burada üretim koşullarına bağlı olarak optik özellikleri bilindiğinden, aynı ince film malzemeler kullanılarak, $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısı kullanılmıştır. Bu yapının, ince film güneş gözesinin performansı üzerine etkisinin incelenmesi için, daha önce kullanılan teknikler olan, tayfsal duyarlılık, yansıtma ve akım-gerilim ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da sonuçlar, kaplama öncesi ve sonrası için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısındaki kaplama sonucunda gözenin optik yansıtması, 580 nm'de 0,032'den 0,009'a düşmüştür. Aynı dalgaboyunda tayfsal duyarlılık 0,37'den 0,41 A/W'a yükselmiştir. Ancak tek katman kaplamalarda gözlenen, kısa dalgaboylarında yansıtmanın artması etkisi, burada da gözlenmiştir. Yaklaşık 500 nm'den daha kısa dalgaboylarındaki tayfsal duyarlılık verisi, kaplama sonucu, azalmıştır. Bunun temel nedeni tasarımda a-SiN_x:H katmanının kullanılmasıdır. PECVD sisteminde kullanılan üretim parametrelerinde üretilen a-SiN_x:H kaplamaların, cam üzerinde yansıtma kaplamaya uygun koşullarda üretilmesi gerektiği sonucunu çıkartmaktadır.

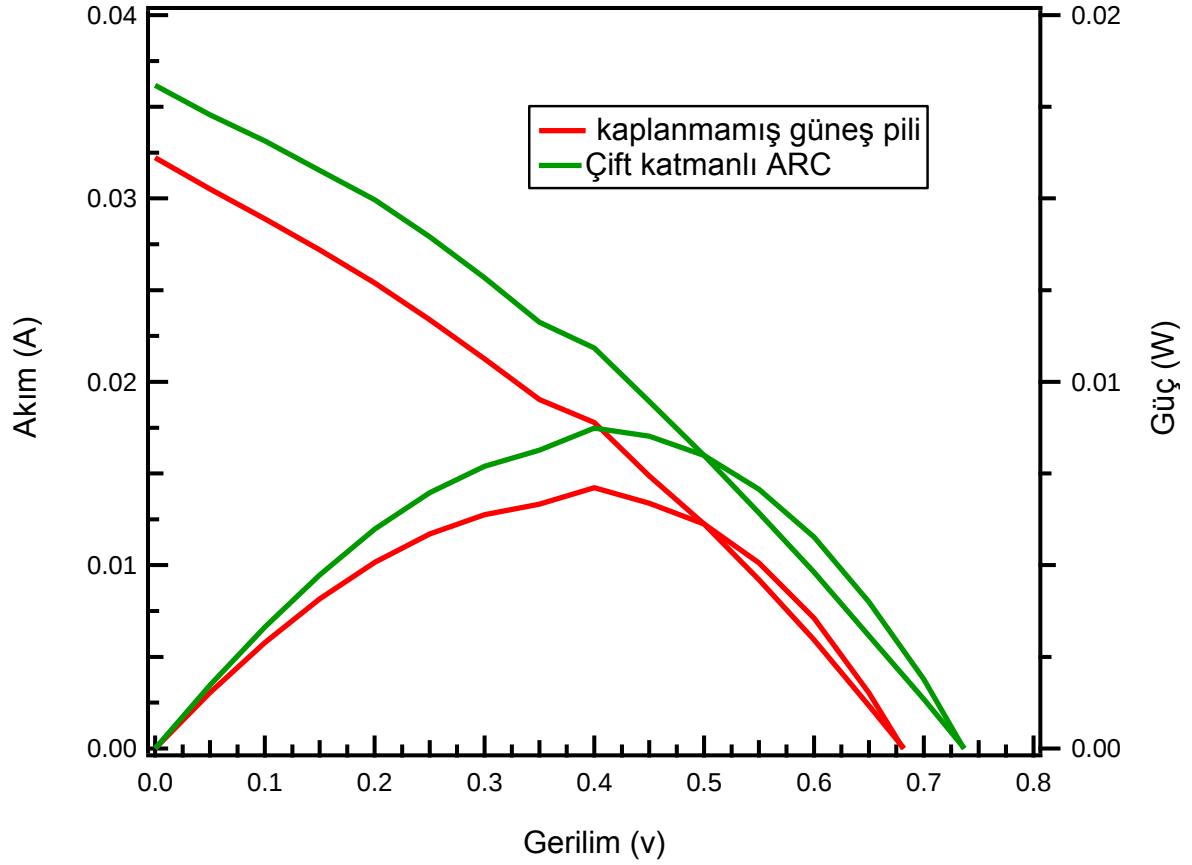


Şekil 5.7. a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası yansıtma spektrumları.



Şekil 5.8. a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası tayfsal duyarlılığı.

a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısındaki çift katman yansıtma kaplanmış güneş gözesinin kısa devre akımı, kaplama sonucunda, 32×10^{-3} 'ten 36×10^{-3} A 'e yükselmiştir. Aynı zamanda açık devre voltajı ve doluluk oranı da, sırasıyla, 0,68'ten 0,73 V'a ve 0,31'den 0,33'e çıkmıştır. Bunların sonucunda güneş gözesinin veriminin, % 13×10^{-3} 'den 17×10^{-3} 'a çıktığı görülmüştür.

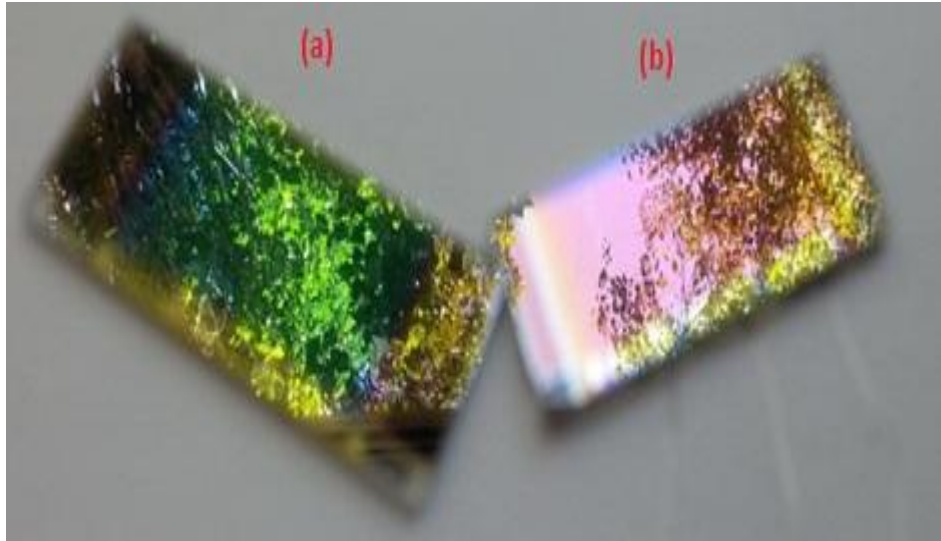


Şekil 5.9. $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$ yapısındaki yansıtma kaplama yapılmış güneş gözesi için, kaplama öncesi ve sonrası için akım-gerilim ve güç gerilim eğrileri

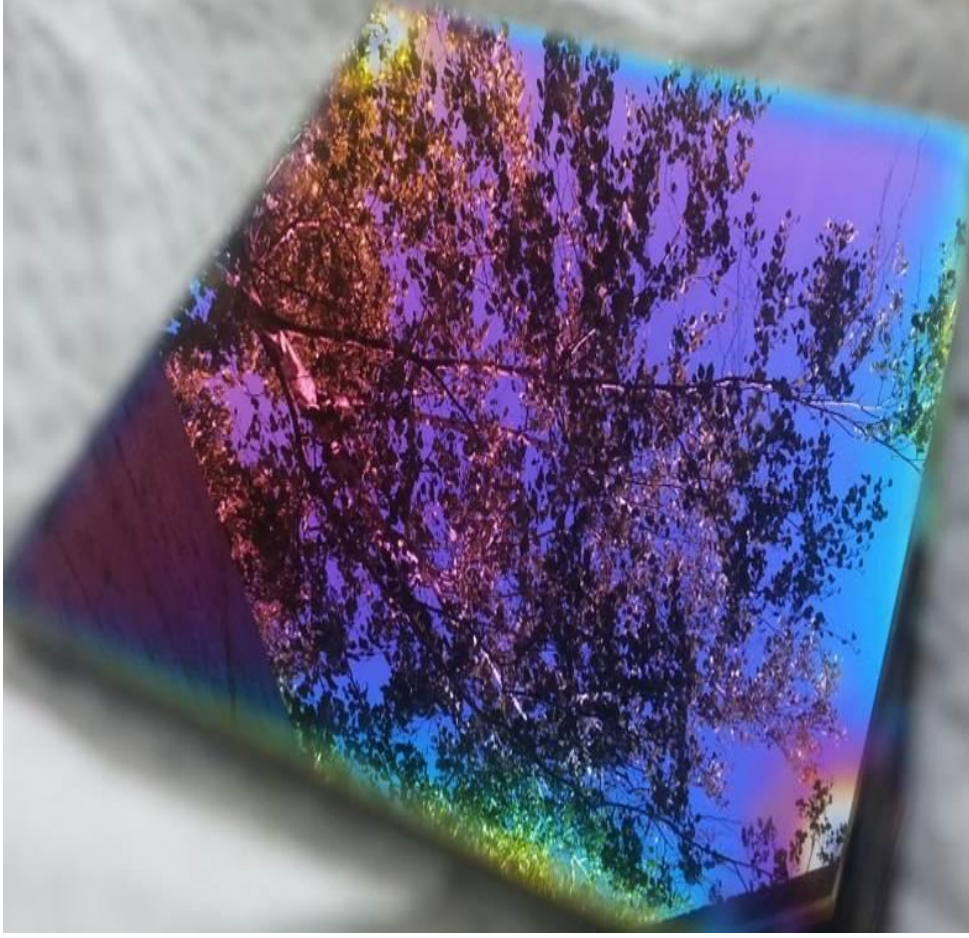
Çizilge 5.1 de tek katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}$ ve $a\text{-SiN}_x\text{:H}$ ve çift katmanlı $a\text{-SiO}_x\text{:H}/a\text{-SiN}_x\text{:H}$, güneş gözesinde kaplama öncesi ve sonrası özelliklerini incelemiştir. Şekil 5.10'da, güneş gözesi üzerinde tek katmanlı (a) 550 nm için tam yansıtıcı ve (b) 550 nm için yansıma önleyici kaplamaları gösterilmiştir. Şekil 5.11'de, Güneş gözesi üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplamaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Kaplanmış ve kaplanmamış güneş gözesi üzerinde kısa devre akımı, açık devre voltajı, doluluk oranı ve verimin değişimi

ARC	durum	V_{oc} (volt)	I_{sc} (mA)	FF	η
a-SiO _x :H	Önce	0,80	2,7	0,25	0,005
	Sonra	0,80	4,0	0,28	0,009
a-SiN _x :H	Önce	0,87	0,85	0,25	0,002
	Sonra	0,87	0,87	0,26	0,003
DLARC	Önce	0,68	32	0,32	0,013
	Sonra	0,73	36	0,33	0,017



Şekil 5.10. Güneş gözesi üzerinde tek katmanlı (a) 550 nm için tam yansıtıcı ve (b) 550 nm için yansıma önleyici kaplamalar.



Şekil 5.11. Güneş gözesi üzerinde çift katmanlı yansıma önleyici kaplama

6. SONUÇLAR

Cam ya da kristal alttaban üzerine üretilmiş güneş gözelerinin performanslarının artırılmasında kullanılmak üzere, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H yansıtma kaplamalar tasarlanmış ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) sisteminde üretilmiştir. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H malzemeler kullanılarak, cam ve tek-kristal silisyum için, tek katman ve çift katman yansıtma kaplamalar tasarlanmış ve üretilmiştir. Optik yansıma deneyleri ile performans testi yapılmıştır. Daha sonra, piyasadan satın alınan amorf silisyum ince film güneş gözeleri üzerine tek katman ve çift katman yansıtma kaplamalar üretilerek, gözelerin performansına olan etkisi incelenmiştir.

a-SiO_x:H ince filmler, SiH₄ ve CO₂ gaz karışımının; a-SiN_x:H ince filmler ise, SiH₄ ve N₂ gaz karışımının 13,56 MHz RF plazmasının alttaban üzerine büyütülmesiyle elde edilmiştir. Tüm örneklerin üretiminde alttaban sıcaklığı 200 °C ve reaktör basıncı 400 mTorr'da sabit tutulmuştur. SiH₄ gazının akışı, ile toplam gaz akış hızları, hem a-SiO_x:H hem de a-SiN_x:H için, sırasıyla, 2 ve 10 sccm olarak ayarlanmıştır. RF gücü ise; a-SiO_x:H örneklerde 10 W, a-SiN_x:H örneklerde 12 W olarak belirlenmiştir.

Altaş üzerine ince film üretilme hızının belirlenmesi için, aynı hazırlama koşullarında ancak değişen deney sürelerinde ince filmler üretilerek, film üretilme hızı hesaplanmıştır. a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H için film üretme süresi, sırasıyla, $12,7 \text{ t} + (7,57 \times 10^{-3}) \text{ t}^2$ ve $14,3 \text{ t} + (2,99 \times 10^{-2}) \text{ t}^2$ olarak bulunmaktadır. AM 1,5G spektrumunun en büyük optik güç yoğunluğuna sahip olduğu dalga boyu olan 550 nm'de, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H'nin kırma indisleri, sırasıyla 1,83 ve 2,33 olarak belirlenmiştir. Optik özelliklerin belirlenmesinde optik geçirgenlik deneyleri yapılmış; kalınlıklar ve kırma indisleri 4. Bölüm'de anlatılan yöntemle hesaplanmıştır.

Cam ve kristal silisyum üzerine üretilen yansıtma kaplamaların tasarımında, kalınlıklar ve gerekli deney süreleri, hesaplanan üretim hızlarının sabit olduğu, film üretiminin başından sonuna kadar değişmez olduğu kabulü yapılmıştır. Benzer biçimde film üretiminin erken evrelerinde de kırma indisinin değişmediği kabul edilmiştir. Üretilen yansıtma kaplamaların yansıtma spektrumları, tez çalışmaları sırasında tasarlanan yansıma ölçümü kutusunda gerçekleştirilmiştir. a-SiO_x:H ile

cam üzerine üretilen yansıtma kaplama 512 nm'de yaklaşık 0,087; tek kristal silisyum üzerinde ise 562 nm'de 0,00244 olarak ölçülmüştür. Öte yandan, cam üzerinde a-SiN_x:H yansıtma kaplama, 542 nm için 0,09456 ve tek kristal silisyum üzerinde, 520 nm için 0,08500 yansıtma göstermiştir.

Aynı özellikte a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince filmler kullanılarak, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H çift katman yansıtma kaplamalar da tasarlanmıştır. Çift katman yansıtma kaplamalar, cam üzerinde 542 nm için 0,035, tek kristal silisyum için 548 nm için 0,0084 olarak ölçülmüştür.

Cam ve tek kristal silisyum alttabanlar üzerine üretilen, tek katman ve çift katman yansıtma kaplamaların üretimi ve yansıtma ölçümlerinin yapılmasından sonra, piyasadan satın alınan güneş gözelerinin üzerine kaplama yapılması ve göze performanslarındaki değişimin incelenmesi çalışmalarına geçilmiştir. Bu amaçla üç adet, cam üzerine üretilmiş, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince film güneş gözesi alınmıştır. Gözelerden ikisine, a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H yansıtma kaplamalar; diğer göze ise a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısında yansıtma kaplama tasarlanmış ve üretilmiştir. Yansıtma kaplama yapılmış güneş pillerinde, kaplama öncesi ve sonrasında; tayfsal duyarlılık, optik yansıtma ve akım-gerilim ölçümleri yapılmıştır. Ancak bu aşamada, güneş gözelerinin üzerine üretilen yansıtma kaplamaların çalışma dalga boyu olarak AM 1,5G'nin tepe dalga boyu 550 nm değil, her bir gözünün tayfsal duyarlılığının tepe yaptığı dalga boyunda tasarım yapılmıştır.

a-SiO_x:H ile 580 nm için tasarlanan yansıtma kaplama ile güneş gözesinin tayfsal duyarlılığı 32'den 39 A/W'a artmıştır. Bu artış yaklaşık % 22'ye karşılık gelmektedir. Gözenin optik yansıtması ise 0,17'den 0,14'e düşürülmüştür. Şiddeti 100 mW/cm² olarak ayarlanan kuartz halojen aydınlatma altında yapılan ölçümlerde; kısa devre akımı 2,7 'den 4,0 mA'e; gücü 0,84'ten 0,86 W'a; doluluk oranı ise 0,24'ten 0,27'ye; verimi ise % 0,5'ten % 0,9'a yükselmiştir. Ancak açık devre voltajı 0,8 V'ta değişmez kalmıştır.

İkinci güneş gözesinin üzerine, a-SiN_x:H ile yapılan yansıtma kaplama tasarımının sonucunda, gözünün yansıtması 540 nm'de 0,164'ten 0,112'e düşmüştür. Tayfsal duyarlılığı 540 nm için, 0,43'ten 0,47 A/W'a yükselmiştir. IV ölçümlerinden ise; kısa devre akımı, 0,85'ten 0,87 mA'e; doluluk oranı 0,25'ten

0,26'ya, verim ise 0,002'den 0,003'e çıkmıştır. Açık devre voltajı ise kaplama öncesi ve sonrasında 0,85 V değerinde kalmıştır.

Diğer göze ise a-SiO_x:H/a-SiN_x:H yapısında çift katman yansıtma kaplama ile kaplanmıştır. Optik yansıtması, yansıtma kaplama sonucunda, 580 nm'de 0,032'den 0,009'a düşmüştür. Bunun karşılığında, gözenin tayfsal duyarlılığı 0,37'den 0,41 A/W'a yükselmiştir. Şiddeti 100 mW/cm² olan aydınlatma altında yapılan ölçümlerde, gözenin kısa devre akımı 0,032'den 0,036 A'e; açık devre voltajı 0,68'ten 0,73 V'a; doluluk oranı 0,32'den 0,33'e; verimi ise % 1,3'den % 1,7'ye yükselmiştir.

Tez çalışması boyunca üretilen yansıtma kaplamalar çeşitli deneysel yöntemler ile test edilmiştir. Tek kristal silisyum üzerine yapılan kaplamaların tümü, kaplamasız kristal silisyuma oranla, yeterince iyi performans göstermiştir. Ancak cam alttaban üzerine üretilen kaplamalar, kaplamasız camın yansıtmasından daha düşük değerlere ulaşamamıştır. Bunda en önemli neden yapılan kaplamanın kırma indisinin kullanılan a-SiO_x:H ve a-SiN_x:H ince filmlerin kırma indislerinin camın kırma indisinden küçük olmamasıdır. PECVD yöntemiyle cam üzerine yapılacak yansıtma kaplamanın üretilmesi için farklı üretim parametrelerinin belirlenmesi gereklidir.

Cam üzerine üretilmiş amorf silisyum tabanlı gözeler için tasarlanan yansıtma kaplamalarda ise, sonuçlar tayfsal duyarlılık ve akım gerilim ölçümleriyle de desteklenmiştir. Güneş gözeleri için yapılan tasarımlarda, yansıtma kaplamanın 550 nm için değil de her bir gözenin sergilediği tayfsal duyarlılığın en büyük olduğu dalgaboyunun kullanılmış olması nedeniyle, bir performans artışı beklenmiştir. Tayfsal duyarlılığın en büyük olduğu dalgaboylarında, yansıtma kaplama yapılması sonucunda, bağıl artış miktarı ile, güneş gözelerinin sergilediği verimlilik ilişkilendirilebilir. Buna göre, tayfsal duyarlılıktaki en büyük bağıl artış, tek katman a-SiO_x:H kaplamanın yapıldığı güneş gözesinde % 22 (32'den 39 A/W'a) olarak ölçülmüştür. Bu güneş gözesinde beklenen verimlilik artışı ise, yine yaklaşık olarak % 22 olarak beklenmesine karşın, verim, beklenenin üzerinde, yaklaşık % 80 kadar (% 0,5'ten % 0,9'a) artmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Gichuhi Mutitu, J., *Light trapping designs for thin silicon solar cells*, Master of Degree in Major, University of Delaware, Delaware, 42, 27, **2010**.
- [2] Yanarcan doğan, N., *Yer gözlem uydularında yansıtıcı ve yansıma engelleyici optik kaplamalar*, Yüksek lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2010**.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_\(scientist\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_(scientist)) (Eylul, **2014**).
- [4] Feynman, R. P., *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 3, ss.1–8, ISBN 0201021188 P, USA, Addison-Wesley, **1965**.
- [5] Darling, D., "Wave - Particle Duality", *The Worlds of David Darling*, **2007**. <http://www.daviddarling.info/> (Kasım **2014**).
- [6] Schulz, U., Wideband antireflection coatings by combining interference multilayers with structured top layers, *Fraunhofer Institute of Applied Optics and Precision Engineering*, A.-Einstein-Str. 7, 07745 Jena, Germany, **2009**.
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer-matrix_method_\(optics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Transfer-matrix_method_(optics)) (Kasım **2014**).
- [8] Piegari, A., Flory, F., *Optical thin films and coatings*, materials to applications, 5, **2013**.
- [9] Liena, S.Y., Wu, D.S., Yeh, W.C., Liu, J.C., *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 2710–2719, **2006**.
- [10] Sexton, F.W., *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 7,1, **1991**.
- [11] Kishore, R., Siingh, S.N., Das, B.K., *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 26,27,**1992**.
- [12] Chen, Z., Sana, P., Salami, J., Rohatgi, A., *IEEE Trans. Electron Devices*, 40, 1161,**1993**.
- [13] Ram, K., Singh, S.N., Das, B.K., *Journal of Renewable Energy*, 12, 131, **1997**.
- [14] Battaglin, C., Caccavale, F., Menelle, A., Montecchi, M., Nichelatti, E., Nicoletti, F., *Journal of Thin Solid Films*, 351,176, **1999**.
- [15] Gangopadhyay, U., Kim, K., Mangalaraj, D., Yi, J., *Journal of Applied Surface Science*, 230,364, **2004**.
- [16] Jung, S.M., Kim, Y.H., Kim, S.I., Yoo, S.I., Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III–V solar cell, *Journal of Current Applied Physics*, 11, 538–541, **2011**.
- [17] Korkmaz, S., Elmas, S., Ekem, N., Pat, S., Balbag, M.Z., *Journal of Optics Communications*, 285,2373–2376, **2012**.
- [18] Kim, K., Kim, S., An, S., Lee, G.H., Kim, D., Han, S., *Journal of Solar Energy Materials & Solar Cells*, 130, 582–586, **2014**.
- [19] Xu, J., Fan, H., Liu, W., Hang, L., *Journal of Diamond & Related Materials*, 17, 194–198, **2008**.
- [20] Jeong, S.H., Kim, J.K., Kim, B.S., Shim, S.H., Lee, B.T., *Journal of Vacuum*, 76, 507–515, **2004**.
- [21] Sessa, P.H.V., Sai, T., Ramana Rao, J.V., Devarayapalli, K.C., Sharma, K.V., *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3, 2249 –8958, **2013**.
- [22] Makableh, Y.F., Vasan, R., Sarker, J.C., Nusir, A.I., Seal, S., Manasreh, M.O., *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 178–182, **2014**.

- [23] Prado, R., Beobide, G., Marcaide, A., Goikoetxea, J. Aranzabe, A., *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, 1081–1088, **2010**.
- [24] Duttagupta, S., Ma, F., Hoex, B., Mueller, T., Aberle, A., Optimised Antireflection Coatings using Silicon Nitride on Textured Silicon Surfaces based on Measurements and Multidimensional Modelling, *Journal of Energy Procedia*, 15, 78 – 83, **2012**.
- [25] Wang, Y., Cheng, X., Lin, Z., Zhang, C., Zhang, F., Optimization of PECVD silicon oxynitride films for anti-reflection coating, *Journal of Vacuum*, Volume 72, Issue 3, 345–349, **2003**.
- [26] Wei, M. C., Chang, S.J., Tsia, C. Y., Liu, C. H., Chen, S.C., SiN_x deposited by in-line PECVD for multi-crystalline silicon solar cells, *Journal of Solar Energy*, Volume 80, Issue 2, 215–219, **2006**.
- [27] Bousbih, R., Dimassi, W., Haddadi, I., Slema, S., Rava, P., Ezzaouia, H., Silicon lifetime enhancement by SiN_x:H anti reflective-coating deposited by PECVD using SiH₄ and N₂ reactive gas, *Journal of Solar Energy*, Volume 86, Issue 5, 1300–1305, **2012**.
- [28] Ko, J., Gong, D., Pillai, K., Lee, K. S., Ju, M., Choi, P., Kim, K., Yi, J., Choi, B., Double layer SiN_x:H films for passivation and anti-reflection coating of c-Si solar cells, *Journal of Thin Solid Films*, Volume 519, Issue 20, Pages 6887–6891, **2011**.
- [29] Green, M. A., *High Efficiency Silicon Solar Cells*, Trans Tech Publications, Aedermannsdorf, p. 181, **1987**.
- [30] S. M. Sze, *Semiconductor Devices*, Physics and Technology (Wiley, New York) , p. 315, **1985**.
- [31] Strehlike, S., Bastide, S., Guillet, J., L'evy-Clément, C., *Journal of Materials Science and Engineering. B* 69, 81 **2000**.
- [32] Zhao, J., Wang, A., Altermatt, P., Green, M. A., *Journal of Applied Physics Letters*. 66, 3636, **1995**.
- [33] Pedrotti, S.L., Pedrotti, F.L., *Introduction to Optics*, Prentice Hall, Second Edition. p 602. New Jersey, **1999**.
- [34] Pedrotti, S.J., Frank L., Pedrotti, L.M., Pedrotti, L.S., *Introduction to optics*, Third edition, Pearson Addison Wesley, 477-485, United States of America, **2007**.
- [35] Üçer, B., *design and production of antireflection coating for Ge, ZnSe and ZnS in 8-12 micrometer wavelength region*, Master of science, The Middle East Technical University the Graduate School of Natural and Applied Sciences, **2009**.
- [36] Bunshah, R. F., *Handbook of Hard Coatings*, Elsevier, 386, New York, **2000**.
- [37] Macleod, H. A. *Thin Film Optical Filter*, McGraw- Hill, p 641, New York, USA **2001**.
- [38] Holmberg, K., Matthews, A., *Coatings Tribology, Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, s. 442, Tribology Series 28, The Netherlands, **1994**.
- [39] Smallman, R.E., Ngan, A.H.W., *Physical Metallurgy and Advanced Materials*, *Seventh Edition*, s. 672, Butterworth-Heinemann, **2007**.
- [40] Gerhard, W., *Nanostructured Materials*, s. 384, Elsevier Science, **2009**.

- [41] John, E.M., *Physical Vapor Deposition of Thin Films*, s. 336, Wiley-Interscience, **2000**.
- [42] COŞKUN, M. İbrahim., *Dc manyetik alan sıçratma tekniği ile üretilen $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ nano filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi*, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, yüksek lisans tezi, **2011**.
- [43] Bülbül, F., *Darbeli-DC Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi İle Kaplanan TiB_2 ve Me-DLC Filmlerin Mekanik, Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2006**.
- [44] Yılmaz, T., *Saçtırma Tekniğiyle Hazırlanan Kobalt İnce Filmlerinin Manyetik Karakterizasyonu*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, **2008**.
- [45] Kiyotaka, W., Shigeru, H., *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Noyes Publications, United States of America, 304 pages, **1992**.
- [46] Mattox, D. M. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Noyes Publications, 878 p, Park Ridge, USA (ISBN 0-8155-1422-0) **1998**.
- [47] Street R.A., *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge Univ.Press, Cambridge, 417, **1991**.
- [48] Hasançebi, Ö., *Electrical, Structural and Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Method*, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, **2006**.
- [49] Jeffrey B.C., George, W., Scherer Sol-gel Science: *The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing*, 908, Gulf Professional Publishing, Park Ridge, **1990**.
- [50] Alan P.C., Introduction to Sol-Gel Processing, The International Series in Sol-Gel Processing, *Technology and Applications*, 408, Kluwer Academic Publisher, New York, **1998**.
- [51] Green M.A., *Solar Cells. Operating Principles, Technology and System Applications*, The University of New South Wales, Kensington, **1986**.
- [52] Lipinski M., Zieba P., Jonas S., Kluska S., Sokołowski M., Czternastek H., *Optimisation of SiNx:H layer for multicrystalline silicon solar cells*, Opto-Electronics Review 12(1), pp. 41–44, **2004**.
- [53] Morigaki,K, *physics of semiconductors*, Imperial college Press, London, 418P., **1999**.
- [54] Ganguly, G, Matsuda, A., Defect formation during growth of hydrogenated amorphous silicon , *Journal of Physical Review.B*, 47,3661-3670,**1993**.
- [55] Matsuda, A, Takai ,M., Nishimoto ,T., Kondo ,K., Control of plasma chemistry for preparing highly stabilized amorphous silicon at high growth rate, *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 78,3-26, **2003**.
- [56] Bacioğlu, A., *PECVD silisyum altoksit ($\text{a-SiO}_x\text{:H}$, $X<2$) ince filmlerde fotoluminesans işleyişleri*, Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , **2006**.
- [57] Tagaki, T., Hayashi, R., Ganguly, G.,Kondo, M., Matsuda, A., Gas_phase diagnosis and high-rate growth of stable a-Si:H, *Journal of Thin Solid Films*, 345,75-79, **1999**.
- [58] Dauwe, S., Schmidt, J., Hezel, R., *Proc. 29th IEEE PVSC*, New Orleans, USA, 1246, **2002**.

- [59] Hezel, R., and Schörner, R., *Journal of Applied Physics*, 52, 3076, **1981**.
- [60] Duerinckx, F., and Szlufcik, *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72, 231, **2002**.
- [61] Matsumoto, Y., Melendez, F., Asomoza, R., Performance of P-type silicon-oxide windows in amorphous silicon solar cell, *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 66, 163-170, **2001**.
- [62] Jiranapakul, K., Shirafuji, Electron Transport in Oxygenated Amorphous Hydrogenated Silicon Prepared by Reactive Sputtering, Japan. *Journal of Applied Physics*, 26, 517-523, **1987**.
- [63] Bacioğlu, A., Kodolbaş, A.O., Oktü, Ö., Deposition of highly photoconductive wide band gap a-SiO_x:H thin films at a high temperature without H₂-dilution, *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, 49-59, **2005**.
- [64] Guizot J.L., Nomoto K., Matsuda, A., Surface reactions during the a-Si:H growth in the diode and triode glow-discharge reactors, *Journal of Surface Science*, 244, 22-38, **1991**.
- [65] Iftiqar, S.M., *The roles of deposition pressure and rf power in optoelectronic properties of a-SiO_x:H films*, *Journal of Physics D Applied Physics*, 31, 1630-1641, **1998**.
- [66] Taguchi, M., Terakawa, A., Maruyama, E., and Tanaka, M., Obtaining a higher V_{oc} in HIT cells, *Progress in Photovoltaics, Research and Applications*, vol 13, 481, **2005**.
- [67] Robertson, J., *Defect and hydrogen in amorphous silicon nitride*, *Philosophical Magazine B*, Vol 69, No.2, 307-326, **1994**.
- [68] Park, D.-G., Chen, Z., Botchkarev, A.E., Mohammad, S.N., and Morkoç, H., *Philos. Mag. B* 74, 219, **1996**.
- [69] Mei, J.J., Chen, H., Shen, W.Z., and Dekkers, H.F.W., *Optical properties and local bonding configurations of hydrogenated amorphous silicon nitride thin films*, *Journal of Applied Physics* 100, 073516, **2006**.
- [70] Sopori, B., Silicon nitride processing for control of optical and electronic properties of silicon solar cell, *Journal of Electronic Materials*, vol 32, Issue 10, 1034-1042, **2003**.
- [71] Lelievre, J.-F., Kaminski, A., Boyeaux, J.-P., Monna, R., Lemiti, M., *Optical properties of PECVD and UVCVD SiN_x:H antireflection coatings for silicon solar cells*, in: Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialist Conference, *IEEE Cat. No. 05CH37608*, 1111 – 1114, **2005**.
- [72] Santana G., Morales-Acevedo, Optimization of PECVD SiN:H films for silicon solar cells, *Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 60, Issue 2, Pages 135–142, **2000**.
- [73] Karamanav, M., *Güneş enerjisi ve güneş pilleri*, yüksek Lisans tezi, sakarya Üniversitesi, 21, mayıs **2007**.
- [74] Gratzel M., Dye-sensitized solar cells, *Journal of photochemistry and photobiology C: photochemistry Reviews*, 4, 145-153, **2003**.
- [75] Honsberg C., Bowden S., PVCDROM, <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve> (Kasım **2014**).
- [76] Jha, A.R., *Journal of Solar Cell Technology and Application*, 40, **2010**.

- [77] Swanepoel R., Determination of the Thickness and Optical Constant of Amorphous Silicon, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16, 1214, **1983**.
- [78] Eren, T., Hidrojenlendirilmiş nanokristal silisyum (nc-Si:H) tek katman örneklerin üretimi ile elektronik ve optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, **2013**.
- [79] Pankove J. I., *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publication, New York, 422, **1975**.
- [80] Mok T.M. and O'Leary S.K., the Dependence of the Tauc and Cody Optical Gaps Associated with Hydrogenated Amorphous Silicon on the Film Thickness: α I Experimental Limitations and the Impact of curvature in the Tauc and Cody Plots, *Journal of Applied Physics.*, 102 (113525), **2007**.
- [81] Tauc J., Grigorovici R., Vancu A., Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium, *Journal of Phys. Status Solidi b*, 15(2), 627-637, **1966**.
- [82] Cody, G.D., Brooks B.G., Abeles B., *Optical Absorption Above the Optical Gap of Amorphous Silicon Hydride*, 8(1-3), 231-240, **1982**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: OLDOUZ TOFIGH KOUZEHKONANI

Doğum Yeri: TABRİZ

Medeni Hali: BEKAR

E-posta: ouldoz.tofigh@gmail.com

Adresi: Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler, Bölümü, 06800 Beytepe
Ankara

Eğitim

Lise: TAVAN LİSESİ

Lisans: AZAD ÜNİVERSİTESİ

Yüksek Lisans: HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ

Yabancı Dil ve Düzeyi

İNGİLİZCE (İLERİ), TÜRKÇE (İLERİ), AZERİCE (İLERİ), FARŞÇA (İLERİ),

İş Deneyimi:

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition (SATF
2014) Çeşme-İzmir