T.C

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CIGS İNCE FİLM GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN ALTLIK HAZIRLANMASI

Kübra ERDOĞAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİMDALI

GEBZE

2011

T.C

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CIGS İNCE FİLM GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN ALTLIK HAZIRLANMASI

Kübra ERDOĞAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Ali ATA

GEBZE

2011

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : CIGS İNCE FİLM GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN ALTLIK HAZIRLANMASI

YAZAR ADI: KÜBRA ERDOĞAR

Fosil yakıtların zamanla enerji gereksinimi karşılayamayacak şekilde azalması ve çevreyi olumsuz yönde etkilemesi insanlığı alternatif enerjiler arama yoluna sevk etmiştir. Bu alternatif enerji kaynakları gücünü çeşitli doğal kaynaklardan alan ve hiç tükenmeyeceği düşünülen ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır. Bunların başında gelen güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturur. Dünyadaki hayatın temel enerji kaynağı güneştir. Üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yapılara güneş pilleri denir. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik olayına dayanır. Güneş pillerinin birçok çeşidi vardır. Bunlardan birisi de ince film güneş pilleridir. İnce film güneş pillerinde kullanılan malzeme ve işçiliğin az olmasının yanında malzemenin cam metal ve plastik folyo gibi çeşitli malzemeler üzerine geniş yüzeyler halinde kaplanması ince film güneş hücrelerini cazip kılmıştır.

İnce film güneş hücrelerinden birisi de Bakır İndiyum Galyum Diseleneid ince film güneş hücreleridir. Hücrenin veriminin yüksek olması ve uygulanabilirlik açısından önemli bir faktör olan esnekliğin olup olmaması , düşük ya da yüksek maliyete sahip olması gibi faktörler hücrenin bir bileşeni olan altlık tabakasının seçimi için önemlidir. Cam, polimer, metal gibi malzemeler altlık olarak seçilebilir.

Bu tezde seçilecek altlık tabakasının oluşturulacak hücrenin üzerindeki pürüzlülüğü ve adhezyonuna bağlı olarak elde edilebilecek verimi, uygulanabilirlik açısından esnekliği, maliyet ve bulunabilirlik etkileri değerlendirilerek altlık üzerine kaplanması gereken tabakaların seçimi üzerinde durulmuştur.

SUMMARY

THESIS TITLE: SUBSTRATE PREPARATION FOR THIN FILM CIGS SOLAR CELLS

AUTHOR: KÜBRA ERDOĞAR

Decreasing fossil fuels and negative affects on environment, directs mankind to search alternative energies. These alternative energy sources which thought that their reserves are endless and don't harmfull on environment. Solar power which leads these energies, provides a basis of renewable energies. The main energy source of life on Earth is the sun. When sunlight falls on structures that convert sun's energy directly into electrical energy called solar cells. The working principle of solar cells, based on photovoltatic event. There are many types of solar cells. One of these types is thin-film solar cells. Using less material and labour, also coated wide surfaces at variety of materials such as glass, metal and plastic foil made thin-film solar cells desirable. One of the thin-film solar cells is copper indium gallium diseleneid. High efficiency of the cell and the presence or absence of flexibility (which is an important factor), low-or high cost factors are important for the selection of substrate as a component of the cell. Materials such as glass, polymer and metal can be select as substrate.

In this thesis, substrate’s efficiency depending on roughness and adhesion on the cell which is going to be generate, flexibility in terms of feasibility, cost and availability effects are evaluated and also elaborated the selection of layers which need to be coated on substrate.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca imkanlarını benim için kullanan kıymetli hocam Prof. Dr. Ali ATA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımda benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Işıl KUTBAY, Dr. Furkan DÜNDAR ve Araş. Gör. Begüm ÜNVEROĞLU'na sonsuz teşekkürler.

Maddi manevi her zaman yanımda olan aileme teşekkürler.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET iv

SUMMARY v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER DİZİNİ vii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ x

ŞEKİLLER DİZİNİ xiii

TABLOLAR DİZİNİ xvi

1.GİRİŞ 1

2. ENERJİ KAYNAKLARI VE YENİLENEBİLİR ENERJİ 3

3. GÜNEŞ PİLLERİ 6

3.1 Tanım ve Tarihçe 6

3.2 Güneş Pillerinin Yapısı: Yarı İletkenler 7

3.2.1 Elektronlar ve Boşluklar 8

3.2.2 Rekombinasyon ve Taşıyıcı Ömrü 13

3.3 Işık ve Yarı İletken Etkileşimi 16

3.4 Güneş Pillerinin Çeşitleri 21

3.4.1 Tek Kristalli Silikon Güneş Pilleri 21

3.4.2 Çok Kristalli Güneş Pilleri 22

3.4.3 İnce Film Güneş Pilleri 23

3.4.3.1 Amorf Silisyum Güneş Pilleri 23

3.4.3.2 Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri 26

3.4.3.3 Bakır İndiyum Galyum Diseleneid Güneş Pilleri 27

4. BAKIR İNDİYUM GALYUM DİSELENEİD (CIGS) GÜNEŞ PİLLERİ 30

4.1 CIGS Konfigürasyonu 30

4.1.1 Altlık 31

4.1.1.1 Esnek Olmayan Altlık Malzemeleri 32

4.1.1.1.1 Soda Kireç Camı 32
4.1.1.2 Esnek Altlık Malzemeleri 33
4.1.1.2.1 Polimerler 33
4.1.1.2.2 Metaller 34
4.1.2 Elektriksel Yalıtkan Tabaka 36
4.1.3 Elektriksel Arka Kontak Tabaka 37
4.1.4 Soğurucu Tabaka 37
4.1.5 Tampon Tabaka 38
4.1.6 Ön Elektriksel Kontak Tabaka 38
4.2 CIGS'ın Kristal Yapısı ve Bant Aralığı 39
4.3 CIGS' da Stabilite ve Kusurlar 40
4.3.1 Kusur Kimyası 40
4.3.2 Yarı Kararlı Davranış 40
4.4 CIGS Üretim Yöntemleri 41
5. DENEYSEL MATERYAL VE METOD 46
5.1 Seçilen Altlık Malzemelerinin Hazırlanması ve Analiz İçin Temizleme İşlemi 47
5.2 Uygulanan Analiz Metotları 47
5.2.1 Spektral Analiz 47
5.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi 48
5.2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi 48
5.2.4 X Işını Kırınımı Analizi 48
5.3 Yalıtkan Malzeme Seçimi ve Seçilen Kaplama Metodu 49
5.3.1 Yalıtkan Malzeme Seçimi 49
5.3.2 Sol Jel Metodu 49
6.DENEYSEL SONUÇLAR 50
6.1 Spektral Analiz Sonuçları 50
6.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi Sonuçları 51
6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçları 60

6.4 X Işını Kırınımı Analizi Sonuçları 66
7.GENEL SONUÇLAR 69
KAYNAKLAR DİZİNİ 70
ÖZGEÇMİŞ 74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

TW : Terawatt

TR : Eser Miktar

T : Sıcaklık

$N_İ$: İletkenlik Bandındaki Birim Hacim Başına Düşen Elektron Sayısı

N_V : Valans Bandındaki Birim Hacim Başına Düşen Elektron Sayısı

E_g : Enerji Aralığı

n_i : Katkısız Taşıyıcı Konsantrasyonu

N_C : İletkenlik Bandındaki Düzeylerin Etkin Yoğunluğu

k : Boltzman Sabiti

m_{ce} : İletkenlik Bandındaki Elektronların Etkin Kütlesi

E_C : İletkenlik Bandının Enerjisi

E_V : Valans Bandının Enerjisi

E_D : Donör atomu üzerindeki elektronun enerjisi

E_A : Akseptör atomu üzerindeki elektronun enerjisi

N_D : Donör atomlarının birim hacimdeki konsantrasyonu

N_A : Akseptör atomlarının birim hacimdeki konsantrasyonu

N_D^+ : İyonize donör atomlarının konsantrasyonu

N_A^- : İyonize akseptör atomlarının konsantrasyonu

f(E) : Elektronun bulunma olasılığı

E_f : Fermi Enerjisi

ρ : Yük Yoğunluğu

q : Birim yük

p_n : p bölgesindeki azınlık yük taşıyıcıları

n_p : n bölgesindeki azınlık yük taşıyıcıları

ε : Yarı İletkenin Elektriksel Geçirgenliği

E_{Ph} : Fotonun Enerjisi

λ : Fotonun Dalga Boyu

c : Işık Hızı

h : Planck sabiti

f : Yansıtma Katsayısı

Ω : Gelen Işığın Şiddeti

T' : Işık Geçirimi

n_{c1} : Ortamın kırılma indisi

n_{c2} : Işığın üzerine düştüğü malzemenin kırılma indisi

k_1 : Sönümlenme katsayısı

J_{Ph} : Elektronların hareketi ile oluşan fotoakım

P_{max} : Elde edilen maksimum güç

N_{Ph} : Foton konsantrasyonu

R : Gaz Sabiti

a_{Cu} : Çözeltideki bakır atomu aktivitesi

a_{Cu}^{+} : Çözeltideki bakır iyonu aktivitesi

a_{In} : Çözeltideki indiyum atomu aktivitesi

a_{In}^{+3} : Çözeltideki indiyum iyonu aktivitesi

RF : Radyo Frekansı

CSS : Kapalı Alanda Süblimasyon

CBD : Kimyasal Banyo Çöktürme

ED : Elektrokaplama

MOCVD : Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme

AP-MOCVD : Atmosferik basınçta metal organik kimyasal buhar çöktürme

LP-MOCVD : Düşük basınçta metal organik kimyasal buhar çöktürme

AA-MOCVD : Aeresol destekli metal organik kimyasal buhar çöktürme

PLD : Darbeli Lazer Çöktürme

ALD	: Atomik tabaka kaplama
ILGAR	: İyon tabakası gaz reaksiyonu
SP	: Film Baskısı
PVD	: Fiziksel Buhar Çöktürme
OVC	: Düzenli Boşluklu Bileşik
RITL	: Oda Sıcaklığındaki İyonik Sıvılar
DMSO	: Dimetil sülfoksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1 Ekonomi- Enerji-Çevre Çıkmazı 4

3.1 Donör ve akseptör elektronların enerji seviyeleri 10

3.2 n tipi ve p tipi yarıiletken için enerji yer değiştirme diyagramı 14

3.3 n tipi ve p tipi bölgelerin Fermi Enerji seviyeleri 15

3.4 Termal dengede olan enerji mesafe diyagramı 15

3.5 Yarıiletken üzerine düşen ışığın karşılaşacağı durumlar 16

3.6 Yarı iletkene gelen ışığın izleyebileceği yollar 18

3.7 Gelen ışığın ve elektronun enerji durumu diyagramı 19

3.8 Üç Eklemli Amorf silisyum (a) substrat (b)superstrat tipi hücreler 23

4.1 Superstrat konfigürasyonda CIGS Güneş Hücresi 30

4.2 Bazı kalkopirt yarıiletkenlerin bant aralığı ve ortalama örgü sabiti ilişkisi 37

4.3 Kalkoprit CIGS'ın kristal yapısı 39

4.4 Elektrokaplama Sistemi 43

6.1 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası 51

6.2 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası 52

6.3 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası 53

6.4 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası 54

6.5 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası 55

6.6 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası 56

6.7 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası 57

6.8 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası 58

6.9 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey topografyası 59

6.10 Paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü 60

6.11 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 60

6.12 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 62

6.13 Paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü 62

6.14 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 62

6.15 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 63

6.16 Paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü 64

6.17 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 8000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 64

6.18 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri 65

6.19 Paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin XRD Deseni 66

6.20 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin XRD Deseni 67

6.21 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin XRD Deseni 68

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	**Sayfa**
2.1 Elektrik Üretimi (g/kWh) için kirletici emisyon faktörler	3
2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	5
3.1 Bazı yarıiletkenler için farklı sıcaklıklarda hesaplanan katkısız taşıyıcı konsantrasyonunun karesi değerleri	9
3.2 Yüzeyleri kaplanmamış Bazı Yarı iletkenler için hesaplanan yansıtma katsayıları	17
3.3Yüzeyleri silika ile kaplı bazı yarı iletkenler için hesaplanan yansıtma katsayıları	18
3.4 Tek kristal ve polikristal Si hücrelerinin en iyi verim değerleri	22
3.5 a-Si:H tabanlı tek, çift ve çok eklemli aletlerin alanları ve verimlilikleri	
3.6 Farklı kuruluşlar tarafından üretilen silisyum tabanlı aletlerin verimleri	25
3.7 CdTe/CdS Güneş Hücresi ve Modüllerinin Üretim Şekillerine Bağlı Alan ve Verimlilikleri	27
3.8 CIGS Tabanlı Bazı İnce Film Güneş Hücrelerinin Alet yapısı ile birlikte verimleri ve alanları	28
3.9 En iyi geniş alanlı ince film güneş modülleri	29
4.1 Soda Kireç Camının Bazı Özellikleri	33
4.2 Polyimide'lerin Bazı Özellikleri	34
4.3 Bazı Metallerin Özellikleri	35
5.1 Bazı Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri	46
6.1 AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin kütlece ortalama % miktarları	50
6.2 Deneysel, Teorik Cr Miktarları ve hesaplanan hata payları	50

1.GİRİŞ

İnsanlığın geçmişten günümüze ve gelecekte yaşamı devam ettirebilmesi için en büyük gereksinimlerinden biri enerji kaynaklarıdır. Şimdilerde dünyanın enerji tüketimi yıl başına 10 TW ve bu değerin 2050 yılında 30 TW'a kadar ulaşacağı beklenmektedir [Razykov et al., 2011]. Fosil yakıtların zamanla bu gereksinimi karşılayamayacak şekilde git gide azalması ve çevreyi olumsuz yönde etkilemesi insanlığı alternatif enerjiler arama yoluna sevk etmiştir. Bu alternatif enerji kaynakları gücünü çeşitli doğal kaynaklardan alan ve hiç tükenmeyeceği düşünülen ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır. Bunların başında gelen güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturur. Dünyadaki hayatın temel enerji kaynağı güneştir. Güneş'in Dünya'ya gönderdiği bir günlük enerji, tüm insanlığın bir gün boyunca ihtiyaç duyacağı enerjinin neredeyse on bin katıdır.

Güneş enerjisinin temelleri 1839 yılında fotovoltatik olayının Becquerel tarafından bulunmasıyla atılmıştır [Razykov et al., 2011]. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954 lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir.

Bu amaçla hazırlanan tezin ilk ve ikinci bölümünde geçmişten günümüze enerji kaynaklarının genel durumu ve bunlara alternatif olan yenilenebilir enerji kaynaklarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde güneş pillerinin yapısı olan yarı iletkenlerden, bu yapının işleyişinden ve güneş pillerinin çeşitlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise güneş pillerinin bir çeşidi olan ince film CIGS güneş pilleri

ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Üretilen CIGS güneş pillerinin bir parçası olan altlık tabakasının seçilmesine ve altlık üzerine kaplanacak yalıtkan tabakalar hakkında bilgi verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde üretilecek CIGS güneş pillerinin bir parçası olan altlık tabakasının seçilerek, seçilen altlıkların karakterizasyonları yapılmış ve altlık üzerine sol-jel yöntemi ile yapılan kaplama işleminden sonra yapının tekrar karakterizasyonu yapılmıştır.

Tezin son aşamasında ise çalışmada elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak CIGS güneş pillerinde altlık olarak kullanılması için 430 paslanmaz çeliğin uygun olduğu ve yalıtkan tabakanın kaplanmasına imkan verdiği gözlemlenmiştir.

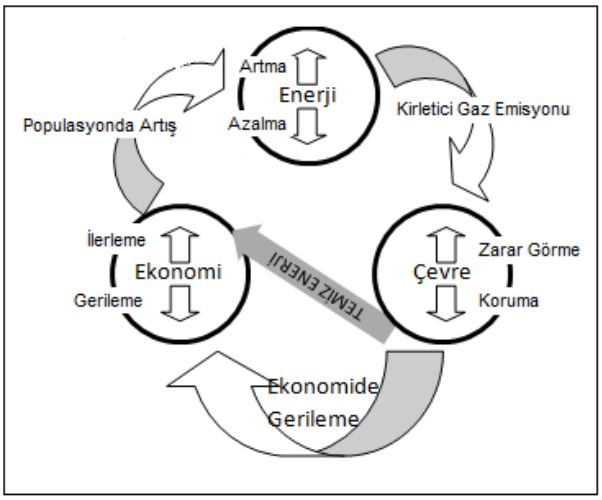
2. ENERJİ KAYNAKLARI VE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Endüstriyel devrim 1765 de James Watt tarafından buharlı motorların bulunmasıyla başlamıştır. 19. Yüzyılda geliştirilen kömür yakıtı ile çalışan buharlı lokomotifler sayesinde tren yolları gelişmiştir. 1860 da Etienne Lenoir'in içten yanmalı motorları icadı ile petrol yakıtı devri başlamıştır [Agency of Natural Resourcesa and Energy, 1998]. Daha sonra 20. Yüzyılda petrol çağı, hava araçları ve otomobil endüstrisi için gazyağı ile çalışan motorların geliştirilmesi ile baskın bir hal almıştır. Enerji kaynakları katıdan sıvı ve gaza dönüşmüştür bu dönüşümün bir sebebi kayakların zamanla azalması iken diğer bir sebebi de çevresel faktörlerdir. Fosil yakıtlar içindeki karbon havadaki oksijen ile birleşerek CO_2 veya CO gazlarını ortaya çıkarmaktadır. Yakıt içerisinde eser miktarda bulunan kurşun, kükürt gibi elementler yanma sıcaklığında oksijen ile birleşerek insan sağlığı açısından tehdit oluşturan SO_x, PbO, NO_x gibi bileşikler oluşturmaktadır. Bu yanma ürünleri atmosfere bırakılmakta ve atmosfer içerisinde birikmektedir. Fotosentez, çürüme gibi tabii dönüşümler bu birikime engel olsa da, aşırı yakıt tüketimi kısa süreli bir birikime neden olmaktadır. Atmosfer içinde biriken yanma gazları güneş ve yer arasında tabii olmayan katman meydana getirmektedir buna aynı zamanda Sera Etkisi denir ve insan, bitki hayatı üzerinde negatif etkiye neden olmaktadır.

Tablo 2.1 Elektrik Üretimi (g/kWh) için kirletici emisyon faktörleri [Ito, 2000]

Enerji Kaynağı	**CO_2**	**NO_2**	**SO_X**
Kömür	322.8	1.8	3.4
Yağ	258.5	0.88	1.700
Doğalgaz	178.0	0.9	0.001
Nükleer	7.8	0.003	0.030
Fotovoltatik	5.3	0.007	0.020
Biyokütle	0.0	0.6	0.140
Jeotermal	51.5	Eser miktar	Eser Miktar
Rüzgar	6.7	Eser miktar	Eser Miktar
Solar Termal	3.3	Eser Miktar	Eser Miktar
Hidroelektrik	5.9	Eser Miktar	Eser Miktar

Tablo 2.1’ den de görüldüğü üzere fosil yakıtlardan elektrik üretiminde meydana gelen kirletici emisyon faktörleri değerleri yüksektir. Bu sebeple yeryüzündeki biyosistemlerin ekolojik dengelerini koruma altında tutmak önemlidir. Dünya enerji trendi analizlerine göre bir ülkedeki kişi başına enerji tüketimi ülkede kişi başına düşen yıllık gelir ile doğru orantılıdır [Hamakawa and Oyobutsuri, 2000]. 2000 yılında 6.1 milyona ulaşan dünya nüfusu sürekli artmaktadır ve bu artışa bağlı olarak enerji gereksinimi fazlalaşmakta ve kullanılan fosil yakıtlarının azalması ve kirletici emisyon gazlarıyla çevreye zarar vermesi ve buna bağlı olarak da ekonomide gerileme meydana gelmesiyle ekonomi çevre ve enerji çıkmazı meydana gelmiştir. Şekil 2.1 de ekonomi, enerji ve çevre arasındaki döngüsel ilişki şematik olarak gösterilmiştir [Hamakawa and Oyobutsuri, 2000]. Bu üçlü çıkmazın çözülebilmesi yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi ile mümkündür.



Şekil 2.1 Ekonomi- Enerji-Çevre Çıkmazı [Hamakawa and Oyobutsuri, 2000]

Yenilenebilir Enerji Kaynakları enerji gücünü çeşitli doğal kaynaklardan alan ve hiç tükenmeyeceği düşünülen ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları Tablo2.2 de özetlenmiştir [Habitat için Geçnlik, 2011].

Tablo 2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları [Habitat için gençlik, 2011]

Yenilenebilir Enerji Kaynakları	**Kaynak veya Yakıtı**
Güneş Enerjisi	Güneş
Rüzgâr Enerjisi	Rüzgâr
Dalga Enerjisi	Okyanus ve Denizler
Biokütle Enerjisi	Biyolojik Artıklar
Jeotermal Enerji	Yer altı Suları
Hidrolik Enerji	Nehirler
Hidrojen Enerjisi	Su ve Hidroksitler

Güneş, yenilenebilir enerji kaynaklarının temelini oluşturur. Dünyadaki hayatın temel enerji kaynağı da güneştir. Güneş pilleri ışık enerjisini soğurarak elektrik enerjisine dönüştürür. Uzaya fırlatılan uydular ihtiyaç duydukları elektrik enerjisini güneş panellerindeki güneş pillerinden sağlar. Güneş'in Dünya'ya gönderdiği bir günlük enerji, tüm insanlığın bir gün boyunca ihtiyaç duyacağı enerjinin neredeyse on bin katıdır.

3. GÜNEŞ PİLLERİ

3.1 Tanım ve Tarihçe

Üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yapılara güneş pilleri denir. Bu enerji dönüşümünde yapıda herhangi hareketli parça bulunmaz. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik olayına dayanır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda ise benzeri durum ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1, değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin et al. tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954 lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki “1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur [Habitat için Gençlik, 2011]. Amerika’da, Avrupa’da, Japonya’da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir.

3.2 Güneş Pillerinin Yapısı: Yarı İletkenler

Güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren katı durumdaki güneş hücresinin güç üreten kısmı yarıiletken yapıdadır. Yapı temel olarak pn diyot ya da Schottky diyot şeklindedir. Bazı eklemlerde ince bir yalıtkan film iki yarı iletken arasında ya da yarı iletken ve metal arasında yer alır. Böylece yarıiletken-yalıtkan-yarıiletken ya da metal-yalıtkan-yarıiletken eklemler oluşur. PN eklemleri eklemin bir tarafında yarıiletken varken diğer tarafında da yarıiletken olmasına ya da olmamasına bağlı olarak iki kısma ayrılır. Bunlara sırasıyla homoeklem ve heteroeklem denir.

İletkenler yapılarında birçok serbest elektron içerir ve bu elektronlar malzeme içerisinde spesifik bölgelere bağlanmamışlardır bu sebeple hareketleri serbesttir ve böylece bir akım oluşturabilirler. Yalıtkanların ise hareketli elektronları yoktur bu sebeple de elektriksel akım oluşturamazlar. Yarı iletken malzemeler ise bu iki malzemenin arasındadır, elektrik akımı taşıyabilirler, negatif ve pozitif yük taşıyıcılarının her ikisinin de varlığı söz konusudur. Yarı iletkenlerin enerji aralığı 1eV mertebesindedir. $T=0^{o}K$ de bütün elektronlar valans bandındadır ve iletkenlik bandında hiç elektron yoktur. Bunun için yarı iletkenler düşük sıcaklıklarda zayıf iletkendir. Normal sıcaklıklarda ise durum tamamen farklıdır. Yarı iletkenlerde fermi seviyesinin enerji aralığının hemen hemen ortasında bulunması ve E_g nin de küçük olması sebebiyle önemli sayıda elektron ısısal olarak valans bandından iletkenlik bandına uyarılır. İletkenlik bandında birbirine yakın çok sayıda boş seviye olduğundan uygulanan küçük bir potansiyel elektronların enerjilerini kolayca iletkenlik bandına çıkarabilir ve orta büyüklükte bir akım meydana gelir. Yarı iletkenlerin iletkenliği sıcaklığa sıkı bağlıdır ve sıcaklık ile hızlı bir şekilde artar bu durum metalin iletkenliği ile zıtlık gösterir metalde iletkenlik sıcaklıkla yavaş bir şekilde azalır.

Yalnızca bir element ya da bileşik içeren saf bir kristalde eşit sayıda iletkenlik elektronu ve boşluk vardır. Yüklerin bu tür bileşimlerine elektron boşluk çifti denir. Yarı iletkene elektrik alan uygulandığında elektronlar alanın tersi yönünde hareket ederler.

3.2.1 Elektronlar ve Boşluklar

Yarı iletkenlerde bant aralığı enerjisi güneş hücreleri için 0.8-2.4eV aralığındadır. Yarı iletkenin sıcaklığı arttığı zaman bazı elektronlar yeteri kadar termal enerjiyi alarak valans bandından hiç elektronu olmayan iletkenlik bandına geçerler. Elektronların bu hareketi ile bir akım oluşur. Valans bandından iletkenlik bandına geçen her bir elektron yerinde bir boşluk bırakır ve bu boşluğa delik denir. Valans bandı artık dolu değildir ve buradaki boşluklar akımın taşınması için bir araç vazifesi görür.

Saf bir yarıiletkende mutlak sıfır noktasının üzerinde herhangi bir sıcaklıkta valans bandındaki boşluk sayısı iletkenlik bandındaki elektron sayısına eşittir. Gerçek rakam kuantum mekaniğinin statik kanunundan belirlenebilir. Boşluk ve elektron yoğunlukları sırasıyla "p" ve "n" ile ifade edilir ve iletkenlik bandında birim hacim başına düzeylerin elektron sayısı N_i ve valans bandındaki birim hacim başına düzeylerin elektron sayısı N_v ile karşılaştırıldığında daha küçüktür. Buradan boşluk, elektron yoğunluklarının N_i ve N_v ye bağlı ifadesini yazacak olursak:

$$pn = N_c\, N_v\, exp\left({}^{-E_g}/_{kT}\right) = n_i^2 \tag{3.1}$$

denklem 3.1 i elde ederiz. Burada p birim hacim başına düşen boşluk sayısını ifade ederken n birim hacim başına düşen elektron sayısını ifade eder. k Boltzman sabiti T mutlak sıcaklık ve n_i de katkısız taşıyıcı konsantrasyonun ifade eder. N_c ve N_v de sırasıyla iletkenlik ve valans bandındaki düzeylerin etkin yoğunluklarıdır. İletkenlik bandındaki düzeylerin etkin yoğunluğunu yazacak olursak:

$$N_c = \left(\sqrt{\{\pi/2\}/\pi^2\hbar^3}\right)(m_{ce}k)^{3/2}T^{3/2} \tag{3.2}$$

Denklem 3.2 yi elde ederiz. Burada m_{ce} iletkenlik bandındaki elektronların etkin kütlesidir. Bu etkin kütle genellikle serbest bir elektronun kütlesine eşit değildir. Bazı yarıiletkenlerin özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir. Valans bandındaki boşluklar için etkin kütle valans bandındaki düzeylerin etkin yoğunluğunu hesaplamak için m_{ce} yerine valans bandındaki boşlukların etkin kütlesi m_{ve} yazılarak denklem 3.2 deki denklem kullanılır. Denklem 3.1 ve 3.2 den görüldüğü üzere katkısız taşıyıcı konsantrasyonu sıcaklığın ve enerji aralığının bir fonksiyonudur. Tablo 3.1 de bazı

yarıiletkenler için bazı sıcaklıklarda sıcaklık ile enerji aralığında meydana gelen değişimlerin etkisini içeren hesaplanan katkısız taşıyıcı konsantrasyonunun karesi değerleri verilmiştir.[Neville, 1995]

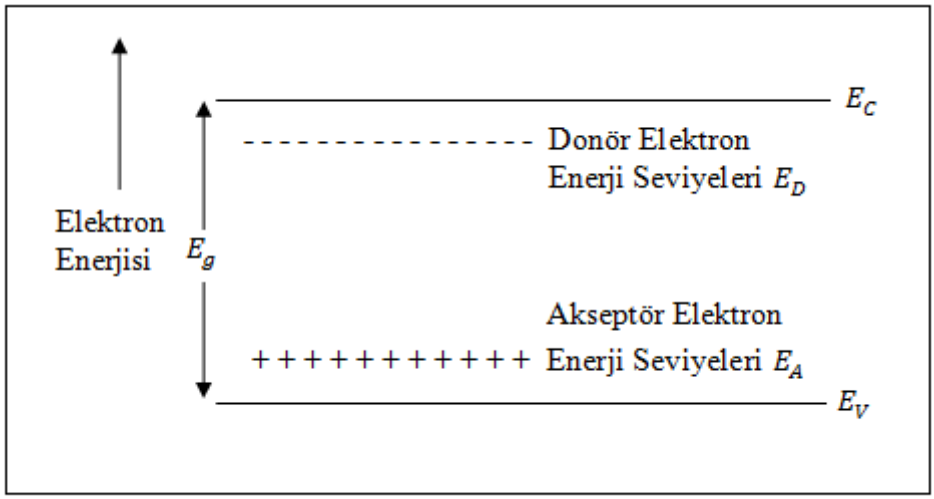
Tablo 3.1 Bazı yarıiletkenler için farklı sıcaklıklarda hesaplanan katkısız taşıyıcı yoğunluğunun karesi değerleri [Neville,1995]

Sıcaklık	**Yarı iletken (cm^{-6})**	**Ge**	**Si**	**InP**	**GaAS**	**CdTe**	**AlSb**	**CdSe**	**GaP**
300 ^{0}K	n_i^2	5.76 x10^{26}	2.10 x10^{20}	6.49 x10^{14}	4.84 x10^{12}	3.17 x10^{11}	1.33 x10^{10}	2.20 x10^{8}	0.58
350 ^{0}K	n_i^2	6.06 x10^{28}	2.22 x10^{23}	2.73 x10^{18}	3.77 x10^{16}	2.97 x10^{15}	3.28 x10^{14}	1.10 x10^{13}	5.27 x10^{5}
400 ^{0}K	n_i^2	2.28 x10^{30}	3.88 x10^{25}	1.50 x10^{21}	3.29 x10^{19}	2.98 x10^{18}	6.85 x10^{16}	3.92 x10^{16}	1.64 x10^{10}
500 ^{0}K	n_i^2	4.14 x10^{32}	7.49 x10^{28}	1.55 x10^{25}	4.82 x10^{23}	5.26 x10^{22}	3.38 x10^{22}	4.08 x10^{21}	3.55 x10^{16}

İletkenlik bandındaki elektronların ve valans bandındaki boşlukların en olası dağılımı kristalin enerjisini minimize eder. Böylece iletkenlik bandındaki elektronlar iletkenlik bandını minimum olarak doldururlar ve boşluklar da ilk olarak valans bandını maksimum derecede doldururlar.

Yarıiletkenlerin saf olabilmelerinin yanında katkılanabilmeleri de mümkündür. Eğer yarıiletkeni elektron ile katkılarsak bu katkı donör olarak bilinir ve eğer boşluk katkısı söz konusu ise de bu katkı akseptör olarak bilinir. Bu bilimsel adlandırma katkının etkisinden ortaya çıkmıştır. Bir donör atomu için elektronun enerjisi iletkenlik bant kenarının az miktar altındadır.

Enerji farkı $E_C - E_D$ ile ifade edilir. İletkenlik bandındaki elektronun konum farkı ile elektron iletkenlik bandına uyarılmasına olanak sağlayan yeterli termal enerjiyi elde eder. Buradaki elektron yük taşıyıcısı gibi davranır. Sabit donör atomları net pozitif q yükü ($1.6x10^{-19}$ c) elde ederler ve iyon haline gelirler. Akseptör de akseptör atomunun yörüngesinde dönen elektronun enerji seviyesi E_A valans bandının maksimum enerjisi E_V nin yaklaşık kT kadar üzerindedir. Bu durumda valans bandındaki elektronlar akseptör atomlarının üzerine termal olarak kolayca uyarılır. Her bir uyarılan elektron valans bandında hareketli bir boşluk bırakır. Şekil 3.1 de donör ve akseptör elektronlarının enerji seviyeleri gösterilmiştir [Neville, 1995].



Şekil 3.1 Donör ve akseptör elektronların enerji seviyeleri [Neville, 1995]

Herhangi bir yarı iletken için termal dengede delik ve elektronların oluşum sayısı sabittir. Bu oluşumu yazacak olursak

$$pn = n_i^2 \tag{3.3}$$

denklem 3.2.1.3 ü elde ederiz. Yarı iletken kristale donörler eklendiğinde elektron konsantrasyonu saf değerin üzerine çıkarken delik konsantrasyonun miktarı azalır. Donör ya da akseptör katkılarının eklenmesi yarı iletken kristalin tamamında makroskobik yük nötralitesini değiştirmeyebilir. Ayrıca yarıiletkendeki boşluk ve elektronların yük nötürlük durumunu sağladığını gösterecek olursak

$$(p + N_D^+) - (n + N_A^-) = 0 \qquad (3.4)$$

denklem 3.4 ü elde ederiz. Burada N_D^+ iyonize donör atomlarının (iletkenlik bandına elektron veren atomlar) konsantrasyonudur ve N_A^- ise iyonize akseptör atomları (valans bandından elektron alan atomlar) konsantrasyonudur.

Oda sıcaklığında yaklaşık 300 ^oK de bir donör için iletkenlik bandına elektron vermek ve bir akseptör için de valans bandından elektron almak kolaydır. Bu durum kolaydır fakat sürekli değildir. Kuantum mekaniğinden bir elektronun bulunma olasılığı $f(E)$ için matematiksel bir ifade elde edebiliriz.

$$f(E) = \left(1 + exp\{[E - E_f]/kT\}\right)^{-1} \qquad (3.5)$$

Burada E_f Fermi Enerjisidir. Fermi Enerjisini belirlemek için denklem 3.4 ü denklem 3.3 ve 3.5 e bağlı olarak çözeriz.

$$n = N_c exp\{[E_f - E_c]/kT\}$$

$$p = N_v exp\{[E_v - E_f]/kT\}$$

$$N_D^+ = N_D exp\,\{[E_D - E_F]/kT\}/(1 + exp\{[E_D - E_F]/kT\})$$

$$N_A^- = N_A/\left(1 + exp\{[E_A - E_f]/kT\}\right) \qquad (3.6)$$

N_D donör katkılarının N_A akseptör katkılarının birim hacimdeki konsantrasyonudur. E_D donör atomu üzerindeki elektronun enerjisi ve E_A da akseptör atomu üzerindeki elektronun enerjisidir.

Güneş hücrelerinde pratik olarak kullanılan yarı iletkenler için denklem 3.4 ve 3.5 incelendiğinde N_D ve N_A nın düzeylerin uygun yoğunluğunun onda birinden az ve bu değerler için katkısız taşıyıcı konsantrasyonundan on kat büyüktür.

$n \tilde{-} N_D = N_D^+ \; eğer \; N_A = 0 \; ise$ ve

$$p \tilde{-} N_A = N_A^- \; eğer \; N_D = 0 \qquad (3.7)$$

Eğer yarıiletken kristalin her bir kübik santimetresine $120n_i$ ye eşit olacak şekilde donör atomları eklenirse her bir kübik santimetredeki elektronların sayısı $120n_i$ olur ve boşlukların hacimdeki konsantrasyonu $n_i/120$ olur. Bu tip yarı iletken n tipi yarıiletken olarak bilinir. Negatif yüke sahip elektronlar burada akım taşıyıcıdır. Saf yarıiletkenin her bir kübik santimetresine $650n_i$ katkısı yapılırsa boşlukların hacimdeki konsantrasyonu $650n_i$ olur ve elektron konsantrasyonu da $n_i/650$ olur. Bu tip yarıiletken p tipi yarıiletken olarak bilinir. Burada yük taşıyıcıları pozitiftir. Eğer yarıiletken kristalde ölçülü olarak hem donör hem de akseptör konsantrasyonu varsa $N_D = N_D^+$ ve $N_A = N_A^-$ varsayımında bulunabiliriz.

$$n + N_A = n_i^2/n + N_D \qquad (3.8)$$

Genellikle katkı atomları yarıiletkene girdiğinde yarıiletkendeki ev sahibi atomlar ile yer değiştirerek etkin donör ya da akseptör haline gelirler. Silikon ya da Germanyum gibi dördüncü grup yarıiletkenler için her bir ev sahibi atomun dört valans bandı elektronu vardır ve bu elektronlar kovalent bağ olarak bilinen atomik etkileşim ile dört komşu atom ile paylaşılır. Dördüncü gruptan olan yarıiletkene beşinci gruptan olan arsenik, fosfor gibi katkı atomları eklendiğinde elektron fazlalığı meydana gelir. Bu elektron gevşek bir şekilde beşinci grup atoma tutturulmuştur ve kolayca atomdan ayrılabilir. Böyle bir element donördür. Boron, indiyum gibi üçüncü gruptan bir element katkısı yapıldığında kristalde bir elektron boşluğu ortaya çıkar. Bu elektron eksikliği boşluk gibi davranır.

Kristali yabancı atomlar ile katkılandırma işlemi için difüzyon veya iyon nakliye teknolojisi ile kullanılır. Difüzyonda kristalin yüzeyine yabancı madde eklediğimizde kristalde bulunan hatalardan veya kristali ısıtarak hareketlendirmeden dolayı, yabancı madde kristalde yerini alarak yayılır. Difüzyon ile katkılandırma iki adımda gerçekleşir. İlk adımda ön katkılandırma yapılır. Ön katkılandırma silikon devre levhaları katkı maddeli gaz atmosferinde 1000 °C 'ye kadar ısıtılır. Yüksek ısı sayesinde katkı maddesi levhanın içine doğru belli bir düzeyde yayılır. Katkılandırma maddesine göre kullanılan gaz türleri PH_3, B_2H_6 ile BN_3 olarak kullanılır. Katkı maddelerinin konsantrasyonu silikon devre levhası yüzeyinde en yoğun olduğu için ikinci adımda inert atmosferde yüksek termik ısı altında atomların yeniden düzenlenmesi ve derine doğru yayılması sağlanır.

İyon nakliye katkılandırması günümüzde daha iyi kontrol edilebildiği ve termik enerji gerekmediği için en yaygın katkılandırma yöntemidir. Bu yöntem sayesinde madde iyonlaştırılarak silikon devre levhası ile yüksek hızla çarpıştırılır ve nakliye edilir. Hızlandırma enerjisi kilo elektro volt ile mega elektro volt arasında olabilir.

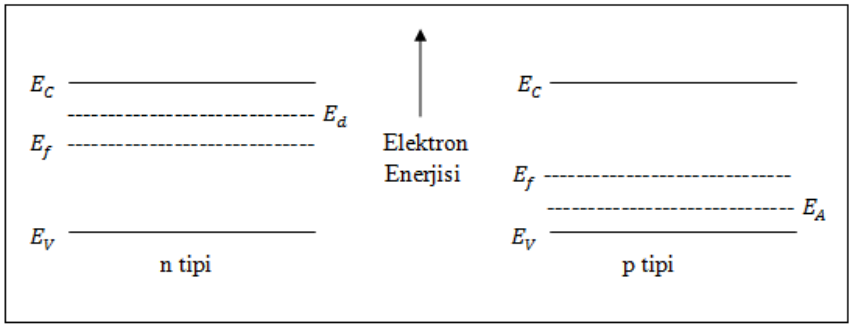
3.2.2 Rekombinasyon ve Taşıyıcı Ömrü

Güneş hücresinde amaç güneş enerjisini elektriksel enerjiye çevirmek ve bu elektriksel enerjiyi harici bir yüke transfer etmektir. Bu durumda yarıiletken içinde akım akması şarttır. Akım pozitif yüklü boşluklar ve negatif yüklü elektronlardan oluşmuştur. Elektron ve boşluklar biri diğerinden ayrılmazsa yeniden birleşirler. Elektron ve boşlukları birbirinden ayırmak için yarıiletkene dışarıdan bir batarya bağlanılabilir ancak bu durum güneş hücresinin kullanım amacına zarar verir çünkü harici yüke transfer edilen enerji fotonlardan değil yarıiletkene bağlanan bataryadan elde edilmiş olur. Elektrik alanı yarıiletkenin bir parçasından elde edebilmeliyiz ve bu elektrik alan yarıiletkenin içinde olmalıdır ve herhangi bir harici enerji kaynağı ile bağlantılı olmamalıdır. Her zaman yarıiletkenin hacminde ve yüzeyinde bir rekombinasyon olabilir fakat optik olarak üretilen elektron-boşluk çiftlerinin büyük çoğunluğu elektrik alan ile ayrılabilir ve bireysel yük taşıyıcıları akım taşımak için kullanılabilir.

Yarıiletken içersinde içsel elektrik alan oluşturmak için çeşitli metotlar vardır. Metotlar genellikle eklem içeren yarıiletken içinde çalışır. Eklem p tipi ve n tipi olan tek yarıiletken kristalden oluşabildiği gibi iki farklı yarıiletkenden ya da oldukça temiz yarıiletken yüzeyine metal uygulayarak oluşturulabilir. Bir tarafı p bir tarafı n tipi olan tek kristal bir yarıiletken ele alalım bunlar başlangıçta yük nötralitesine sahiptir. pn eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder, pn tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Oluşan bu elektrik alan Poisson denklemini doğrular.

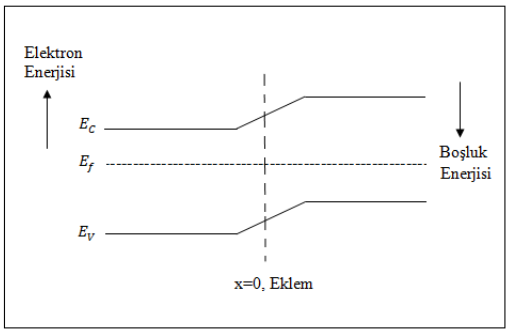
$$\nabla \mathcal{E} = {}^{\rho}/_{\in} = \{q/\in\}\{N_D - N_A\} \qquad (3.9)$$

Burada ρ yük yoğunluğudur ve herhangi bir noktada donör ve akseptör yük yoğunluklarının farkına eşittir. $\in$ de yarıiletkenin elektriksel geçirgenliğidir. Şekil 3.2 de n tipi ve p tipi yarıiletken için enerji yer değiştirme diyagramı verilmiştir [Neville, 1995].



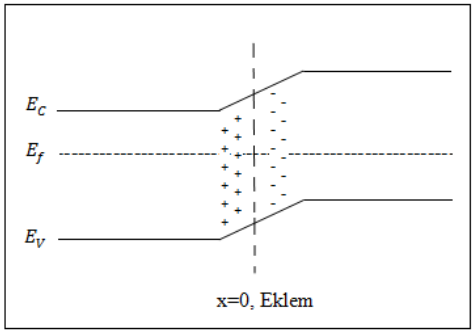
Şekil 3.2 n tipi ve p tipi yarıiletken için enerji yer değiştirme diyagramı [Neville ,1995]

Şekil 3.2 deki bölgeler tek yarıiletken kristalde birleştirildiği zaman n tipi ve p tipi bölgelerin Fermi Enerji seviyeleri Şekil 3.3 de gösterildiği gibi aynı hizada olmalıdır [Neville, 1995]



Şekil 3.3 n tipi ve p tipi bölgelerin Fermi Enerji seviyeleri [Neville, 1995]

Şekil 3.4 deki pn eklem genel anlamda diyot olarak bilinir, termal dengededir ve elektriksel olarak nötrdür. Eklem bölgesinde güçlü bir elektrik alan meydana gelir. Bu elektrik alan bütün elektron ve boşlukları eklem bölgesinden süpürür p bölgesi tarafında negatif n bölgesi tarafında pozitif yük birikir ve Şekil 3.4 de de gösterildiği gibi eklem bölgesinde bir yük dipolü meydana gelir [Neville, 1995].

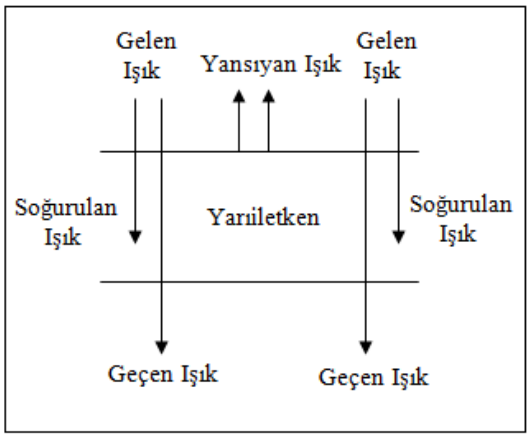


Şekil 3.4 Termal dengede olan enerji mesafe diyagramı [Neville, 1995]

Termal denge koşulları altında dipolde net bir akım akışı olmaz. Büyük difüzyon akımının sağ taraftan sol tarafa akma eğilimi eklem boyunca elektrik alan tarafından sürülen sürüklenme akımı tarafından dengelenmiştir. Şekil 3.3 de termal dengede olan enerji mesafe diyagramından difüzyon uzunluğu L_n olan p tarafında iletkenlik banadındaki herhangi bir elektron n tipi bölgeye geçmeye eğilimlidir çünkü n bölgesinde daha düşük enerjiye sahip olacaktır. Benzer şekilde n bölgesindeki boşluklar da daha düşük enerjiye sahip olacakları p bölgesine geçmeye eğilimlidirler. Çünkü her iki bölgedeki azınlık yük taşıyıcıları p_n ve n_p saf taşıyıcı konsantrasyonundan daha azdır.

3.3 Işık ve Yarı İletken Etkileşimi

Işığın yarıiletken üzerine dik geldiği bir yapı düşünelim. Gelen ışık geniş alanda dalga boylarına sahip fotonlardan oluşur. Fotonlar yarıiletkenin yüzeyine çarptığında fotonun bir kısmı yüzeyden yansır ve kalan fotonlar yarıiletken içine girer. Bu fotonlardan bazıları yarıiletken içinde emilir bazıları da yarıiletkeni geçer ve kaybolur yarıiletken içinde emilen fotonların çoğu elektron boşluk çiftlerinin artışına sebep olur bu elektron boşluk çiftleri fotoakımın kaynağıdır. Bu çiftlerin ayrılmaları ve toplanmaları foto voltaj oluşumunu sağlar. Foto voltaj ve fotoakım üretiminin görülmesi güneş hücrelerinde elektriksel gücün üretildiğinin kanıtıdır. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü gelen fotonların valans bandındaki elektronlara çarpması ve bu elektronları iletkenlik bandına itmesi ve valans bandında bu elektronların yerlerinde boşluklar kalması ve böylece elektron boşluk çiftlerinin oluşması ile gerçekleşir. Şekil 3.5 de yarıiletken üzerine düşen ışığın karşılaşacağı durumlar gösterilmiştir [Neville, 1995].



Şekil 3.5 Yarıiletken üzerine düşen ışığın karşılaşacağı durumlar [Neville, 1995]

Işığın yarıiletken ile etkileşmesi yansıma ile başlar. Bir malzeme üzerine, n_{c1} kırılma insidine sahip bir ortamda ilerleyerek gelen ışını ele alalım. Bu durumda n_{c1} aşağıdaki ifade ile tanımlanır.

$$n_{c1} = n_1 - ik_1 \tag{3.10}$$

Burada k_1 sönümlenme katsayısıdır hava veya vakum ortamda sıfır olarak alınır. n_1 de gerçek kırılma indisidir. Işığın üzerine düştüğü malzemenin kırılma indisi ise aşağıdaki ifade ile tanımlanır.

$$n_{c2} = n_2 - ik_2 \tag{3.11}$$

Ve bu iki ifadeden yararlanılarak yansıma katsayısı elde edilir.

$$f = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2} \tag{3.12}$$

İnce film güneş hücresi üzerine fotonların yansımasından kaynaklanan enerji kaybını azaltıcı anti yansıtıcı kaplama yapılır. Kaplama yarıiletkene uygulandığı zaman yarıiletkene asla zarar vermeyecek şekilde olmalıdır. Yarıiletkende herhangi bir zarar meydana geldiği takdirde yüzeyde rekombinasyon hızında artış meydana gelecektir ve bu durumda üretilen fotoakım değeri daha küçük olacaktır. Anti yansıtıcı tabakanın kalınlığı ve kırılma indisi ışığın dalga boyunun fonksiyonu şeklinde olmalıdır. Anti yansıtıcı tabaka atmosfer ortamına ve direk güneş ışığına maruz kalır havadaki kimyasallar kaplamayı kısa bir süre içersinde bozmamalıdır. Anti yansıtıcı kaplamalar tek tabaka ya da yedi tabakanın kombinasyonundan oluşan bir yapıya sahiptir. Anti yansıtıcı tabaka için örnek vermek gerekirse güneş hücresinde kullanılan sekiz tane yarıiletken düşünülebilir. Bunlar Ge, Si, InP, GaAs, CdTe, AlSb, CdSe, GaP dir. Hava ortamında yüzeyleri kaplanmamış bu yarıiletkenler için yansıtma katsayıları hesaplanmıştır ve Tablo 3.2 de verilmiştir [Neville, 1995].

Tablo 3.2 Yüzeyleri Kaplanmamış Bazı Yarı iletkenlerin yansıtma katsayıları [Neville, 1995]

Yarıiletken	Ge	Si	InP	GaAs	CdTe	AlSb	CdSe	GaP
Yansıtma Katsayısı	0,36	0,30	0,262	0,286	0,207	0,272	0,194	0,294

Eğer bu yarı iletkenler kırılma indisi 1.5 olan silika SiO_2 ile tek tabaka halinde kaplanırsa yarı iletkenlerin yansıtma katsayıları Tablo 3.3 deki gibi olacaktır [Neville,1995]

Tablo 3.3 Yüzeyleri Silika ile Kaplı Bazı Yarı iletkenlerin yansıtma katsayıları [Neville, 1995]

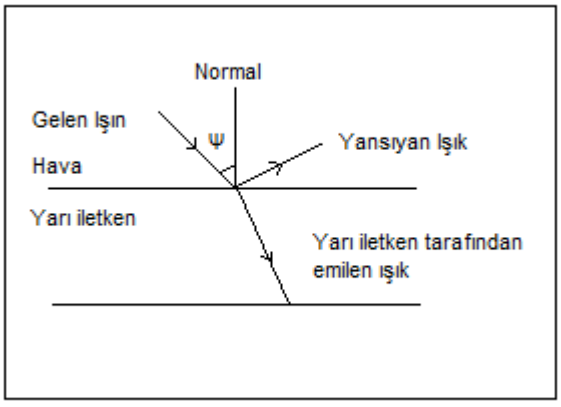
Yarıiletken	Ge	Si	InP	GaAs	CdTe	AlSb	CdSe	GaP
Yansıtma Katsayısı	0,21	0,15	0,120	0,141	0,079	0,130	0,0651	0,147

Güneş hücresinde anti yansıtıcı tabaka kullanmak gelen ışığın yarıiletken içine girmesini iyileştirir. Yansıtma katsayısı ve gelen ışığın şiddetine bağlı olarak ışık geçirimini aşağıdaki denklem ile ifade edebiliriz.

$$T' = (1 - f)\Omega \tag{3.13}$$

Eğer ışık yarı iletkenle açı yapacak şekilde geliyorsa gelen ışığın bir kısmı yansıyacak bir kısmı da yarı iletkenin içinde emilerek elektron delik çiftleri oluşturacaktır. Bu durumda T' Nün değeri aşağıdaki denklem ile ifade edildiği gibi azalacaktır.

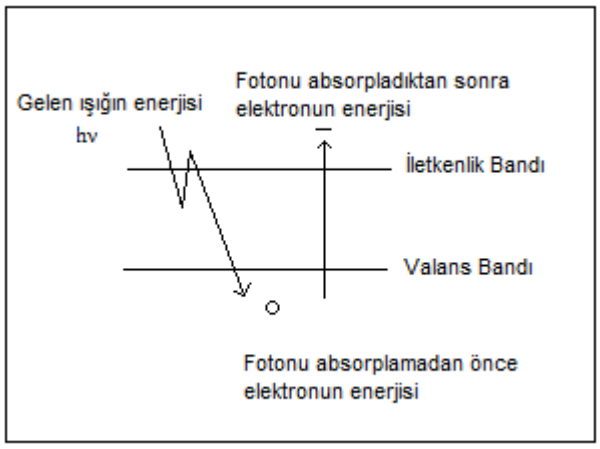
$$T' = (1 - f)\cos(\Psi)\,\Omega \tag{3.14}$$



Şekil 3.6 Yarı iletkene gelen ışığın izleyebileceği yollar [Neville, 1995]

İlk olarak fotonlar yarı iletkene girerler, her bir elektrona çarpar ve enerjilerini elektronlara verirler. Bu enerjiyi alan elektron yarı iletkenin valans ya da iletkenlik bandında ise enerjiyi aldıktan sonra aynı bantta kalır, fotondan kazandığı fazla enerjiyi latis atomları ile çarpışarak hızlı bir şekilde kaybeder. Foton absorpsiyonu yarı iletkenin sıcaklığını arttırır. Valans bandındaki elektron bu banttan ayrılmak için

yeterli enerji aldıysa iki durum gerçekleşebilir. İlk durumda, eğer elektron yasak aralıkta herhangi bir yere yeniden yerleşirse ilk fotona benzer bir foton yayar ve elektron tekrar valans bandına düşer. Bu foton ise yarıiletken tarafından tekrar emilecektir daha sonra aynı şekilde valans bandına tekrar düşen bir elektron tarafından üçüncü bir foton yayılacaktır. Sonunda yarı iletkenden bir foton ortaya çıkacaktır. İkinci durumda ise elektron iletkenlik bandına ulaşmak için yeterli enerjiyi elde ettiyse iletkenlik bandına çıkacak ve valans bandında yerinde bir boşluk bırakacaktır. Böylelikle oluşan elektron boşluk çiftleri önemli miktarda depolanmış enerji taşır. Genellikle elektron iletkenlik bandına çıkmak için gerekli olan minimum enerjiden fazlasına sahiptir böylelikle yüksek enerji seviyesine yerleşecektir. Şekil 3.6 de gösterildiği gibi böyle bir elektronun fazla enerjisi toplam enerjisi ve iletkenlik bandı kenarındaki enerjisi arasındaki fark kadardır. Bu enerji yarı iletkendeki atomların birbirine çarpması ile kaybolur. Bu durum da yarı iletkende net bir sıcaklık artışına sebebiyet verir. Bir kez fazla enerji kaybolur elektron hala etkin bir enerjiye sahiptir ve bu enerji foton ile çarpışmadan önceki enerjisinden büyüktür ve elektron iletkenlik bandının altına yerleşmiştir. Boşluğun da fazla enerjisi vardır. Bu fazla enerjiyi yarı iletken atomları ile çarpışması ile kaybeder. Elektron- Boşluk çiftinin enerjisi bant aralığı enerjisine E_g ye eşit olur.



Şekil 3.7 Gelen ışığın ve elektronun enerji durumu diyagramı [Neville, 1995]

Elektron delik çifti yarı iletkenin iç kısımlarında meydana gelmişse en sonunda rekombinasyona uğrayacaktır ve enerjileri Eg yi ısıya çevirecektir. Bu prosese bant ortası rekombinasyonu denir. Fotonun doğasında olan enerjiyi elektron delik çiftinde kullanılabilecek elektriksel enerjiye dönüştürmek için fotonun enerjisinin

yarıiletkenin enerji aralığına eşit ya da daha büyük olması gerekmektedir. Fotonun enerjisi denklem (3.3.6) da tanımlandığı gibidir.

$$E_{ph} = hc/\lambda \tag{3.15}$$

Yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banttaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-delik çifti oluşur. Bu olay, pn eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-delik çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, delikleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-delik çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Elektronların hareketi ile oluşan fotoakım denklem (3.16) de oluşan güç çıkışı da (3.17) de ifade edilmiştir.

$$J_{ph} = qN_{ph} \tag{3.16}$$

$$P_{max} = \frac{E_g N_{ph}}{Alan} \tag{3.17}$$

3.4 Güneş Pillerinin Çeşitleri

3.4.1 Tek Kristalli Silikon Güneş Pilleri

Birçok ticari silisyum güneş hücresi 400 mikron kalınlığında Boron katkılı tek kristal silikon devre levhası üzerinde Czochralski (CZ) prosesi ile üretilir. CZ prosesi mikro elektronik için gerekli olan standart bir prosestir. CZ ile üretilen Si güneş hücresinde latis kusurları olmamasına karşın oksijen, karbon ve geçiş metali iyonları gibi kalıtsal kirlilikler bulunabilir. Oksijen Boron ile reaksiyona girerek aydınlanmadan sonra malzemenin kalitesini düşürücü elektronik olarak aktif bir kusur meydana getirir. Güneş hücrelerinin üretimi için kullanılan bir başka proses ise Floatzone (FZ) prosesidir. Bu proses ile Si büyütülmesi daha çok tercih edilir çünkü bu yöntemle hücrede daha az rekombinasyon olur ve böylelikle de hücreden elde edilen verim daha yüksek olur [Razykov et al., 2011].

Si güneş hücresinin verimi dört basamağa ayrılarak incelenebilir. Her bir basamak teknoloji ya da hücre yapısında yapılan yeni çözümlerle geliştirilmiştir. Yarı iletken çağının başlarında (1948 lerde bipolar transistor ün keşfinden sonra) %15 verime sahip Si güneş hücrelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. 1970 lerde ikinci basamakta mikro elektronikte elde edilen başarılardan dolayı (örneğin fotolitografi gibi) %17 verimli güneş hücreleri üretilmiştir. En önemli sonuçlar ise üçüncü basamak olan 1980 li ve dördüncü basamak olan 2000 ve sonrasındaki yıllarda elde edilmiştir. Bu yıllarda elde edilen Si güneş hücresi verimleri yaklaşık %25 olmuştur. Bu verim değerleri hücrelerin kontak ve yüzey pasivasyonlarının geliştirilmesi ile elde edilmiştir [Green et al., 2001]. Tek kristal silisyum malzeme, güneş pili üretiminde yüksek verim için kullanılan malzemelerden biri olmakla birlikte, üretim maliyetinin yüksek olması bu alanda değişik seçenek olarak çok kristalli malzemenin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur.

3.4.2 Çok Kristalli Silikon Güneş Piller

Ticari çok kristalli silikon güneş hücreleri yaklaşık %12-15 civarında verim sergileyen hücrelerdir [Razykov et al., 2011]. Polikristalin silikon tabakalar çok çeşitli yöntemlerle hazırlanabilir. Bunlardan bazıları polikristal silisyumun Cu-Si çözeltisinden metalürjik polikristalin altlıklar üzerine çöktürülmesi, plazma kimyasal buhar çöktürme gibi yöntemlerdir. Çok kristalli malzemede damarların kristal yapılarının birbirilerine göre yönlenmeleri dışında elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri özdeştir. Damarların büyüklükleri kristalin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcılarının aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynar. Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin küçülen damar büyüklüğü ile orantılı olarak bozulması, elde edilebilecek verimliliğin tek kristalle karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha az enerji yoğun ve daha kolaydır, sonuç olarak çok kristalli silisyumun maliyeti önemli ölçüde düşüktür. Tek kristalli ya da çok kristalli silisyum güneş pilleri, verimlilikleri ve kararlılıkları ile 1950'li yıllardan bu yana kendilerini ispatlamışlardır [Habitat için Gençlik, 2011]. Tablo 3.4 de elde edilen en iyi tek kristal ve polikristal Si güneş hücresi verimlilikleri gösterilmiştir [Razykov et al., 2011].

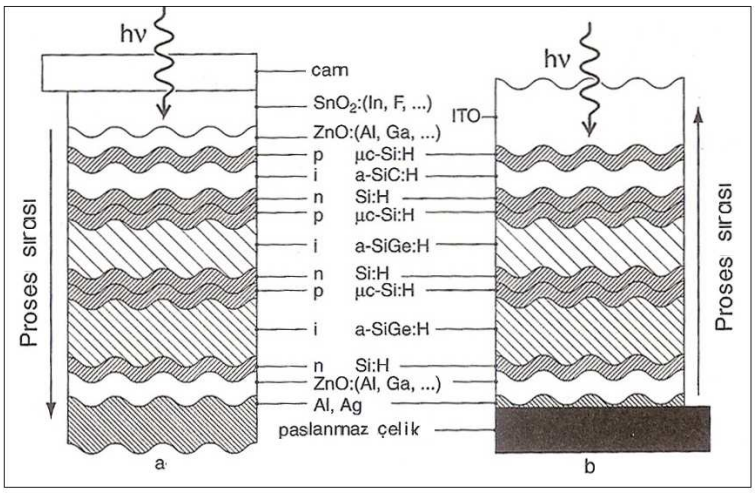
Tablo 3.4 Tek kristal ve Polikristal Si hücrelerinin en iyi verim değerleri [Razykov et al., 2011]

Alet Yapısı	Verim (%)	Referans
Tek kristal Si	24,7	Green (2000a)
Polikristal Si	19,8	Inomota et al. (1996)

3.4.3 İnce Film Güneş Pilleri

3.4.3.1 Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Amorf silisyum güneş hücreleri ince film güneş pilleri grubunda olup bir takım avantajlara sahiptir. Örneğin optik soğurma katsayıları yaklaşık 10^5 cm^{-1} dir. Bu değer oldukça yüksektir ve 1.1-2.5 eV aralığında ayarlanabilir bant aralığına sahiptirler. Bu şekilde amorf silisyum güneş pilleri solar spektrumdan optimum şekilde yararlanabilirler. 300 ^oC nin altında çeşitli çöktürme teknikleri ile üretimleri oldukça kolaydır. pn eklem yapısına sahip diğer ince film güneş hücrelerinin aksine a-Si:H tabanlı güneş hücreleri pin eklem yapıdadır çünkü a-Si:H ve alaşımlarının doğalarında kusur yoğunluğu fazladır ve azınlık yük taşıyıcılarının yaşam ömrü düşüktür. Diğer ince film güneş hücreleri gibi a-Si:H güneş hücreleri de iki tip konfigürasyonda üretilir bunlar substrat ve superstrat yapılardır. Bu yapılar alet yapısının ve altlığın arasındaki geometrik ilişkiye bağlıdır. Tek ya da çift eklemli hücreler superstrat ve üç eklemli hücreler de substrat yapıdadır. Şekil 3.8 de substrat ve superstrat tipi hücreler gösterilmiştir [Hamakawa, 2003].



Şekil 3.8 Üç eklemli amorf silisyum (a) substrat ve (b) superstrat tipi hücreler [Hamakawa, 2003]

Substrat tipi hücre United Solar ve ECD tarafından üretilmiştir ve en yüksek kararlılık verimliliği %13 olarak hesaplanmıştır [Yang et al.,1997,Yang et al., 1997]. Üç eklemli hücre dizaynı spektral ayrılma prensibine dayanır. En üstteki, ortadaki ve

alttaki hücreler sırasıyla mavi, yeşil ve kırmızı fotonları absorplar. Tipik bir yapıda en yukarıdaki hücrenin i tabakası bant aralığı yaklaşık 1.8 eV olan a-Si:H içerir. Ortadaki ve en dipteki hücrelerin i tabakası ise a-Si:Ge:H alaşımını içerir ve bant aralığını sırasıyla yaklaşık 1.6 eV ve 1.4 eV olarak ayarlamaya uygun kompozisyondadır. Her bir i tabakasının kalınlığı bireysel hücreler arasında uyumlu bir akım elde edilecek şekilde ayarlanmıştır ve en üstteki tabaka maksimum akımı sınırlayıcı şekildedir. Üretilen hücrelerde kaydedilen verimlerin elde edilmesinde birtakım yenilikler önemli rol oynamıştır. Bunlar optimize hidrojen seyreltme ve diğer çöktürme koşullarını kullanarak mikro yapıyı kontrol altında tutmak ve i tabakalarının malzeme özelliğini iyileştirmektir. Mikro yapı kontrolü ile mikro yapı amorftan mikro kristal geçiş bölmesine yaklaşır. Bu da yapıdan yüksek verim elde etmek için önemli bir koşuldur. Bir diğer yenilik ise en üst tabakada yüksek iletkenlik ve düşük optik soğurma özelliklerine sahip mikro kristal p tabakası kullanmaktır. Bu durum Voc (>1.0V) geriliminin artmasına katkı sağlar. Bir başka yenilik ise düşük kayıplı tünel eklemlerini geliştirmektir. Bunlara ilaveten paslanmaz çelik altlıklar üzerine Ag/ZnO dokuda arka yansıtıcı kullanmaktır. Böylelikle maksimum optik soğurma için ışık hapsi elde edilir. Üç eklemli ard arda dizilmiş hücrelerde yüksek kararlılıkta verimin elde edileceği fikrine rağmen tek ve ikili eklem hücre yapılarında da bu verimin elde edileceği düşüncesi kuvvetlidir. Tek ve çift eklemli hücrelerde alet yapısı tipik olarak superstart yapıdadır. Burada superstrat saydam iletken bir camdır en üstteki elektrot ve anti yansıtıcı tabaka gibi çalışır. Tek eklemli bir alette bir p-i-n yapının ardından ZnO dan oluşan tampon tabakası ve Ag ya da Al gibi metal iletken superstratın üzerine kurulur. Tipik bir iki eklemli superstart bir alette en üst ve en alt hücreler sırasıyla a-Si:H (p-i-n) ve a-Si:Ge:H (p-i-n) içerir. Tablo 3.5 de bazı kuruluşlar tarafından elde edilen a-Si:H tabanlı tek, çift ve çok eklemli aletlerin alanları ve kararlı verimlikleri gösterilirken [Hamakawa, 2003]. Tablo 3.6 ince film şeklinde üretilen tek kristal ve çok kristal Si dan elde edilen verimler gösterilmiştir. [Razykov et al., 2011].

Tablo 3.5 a-Si:H tabanlı tek, çift ve çok eklemli aletlerin alanları verimlikleri [Hamakawa, 2003]

Alet Yapısı	**Kararlı Verimlilik (%)**	**Alan (cm^2)**	**Kuruluş**
Tek Eklemli a-Si:H	9.3	0.25	United Solar
	9.0	1.0	Tokyo Ins. of Tech
	8.9	1.0	Sanyo
Çift Eklemli a-Si:Ge:H	12.4	0.25	United Solar
a-Si:H/a-SiGe:H	10.6	1.0	Sanyo
	9.1	842	BP Solar
	9.5	1200	Sanyo
	9.3	5000	Sanyo
Üç Eklem	13.0	0.25	United Solar
	10.5	905	United Solar
	12.5	922	United Solar

Tablo 3.6 Farklı kuruluşlar tarafından üretilen silisyum tabanlı aletlerin verimleri [Razykov et al., 2011]

Alet Yapısı	**Verim (%)**	**Referans**
c-Si (ince film)	8.2	Zhao et al. (1998)
a-Si (ince film)	13.7	Hamakawa (1994)

3.4.3.2 Kadmiyum Tellür Güneş Pilleri

Amorf silikondan sonra CdTe tabanlı ince film güneş hücreleri ticari olarak kullanıma uygun hücrelerdir. CdTe/CdS ince film güneş hücreleri heteroeklem yapıdadır. CdTe p tipi absorplayıcı tabaka olarak kullanılır. Bu güneş hücreleri için optimum bant aralığı 1.44eV dir. Direk bant aralığı olan yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Teorik olarak verimi yaklaşık %30 civarındadır. Cu_2S/CdS güneş hücresine benzer şekilde Cu_2Te/CdTe içeren ilk hetero eklem güneş hücresi 1963 de Cusano tarafından üretilmiştir [Cusano, 1963]. Birçok alet yapısında geçtiğimiz son 30 yıl içinde homoeklem, yarıiletken-yalıtkan-yarıiletken eklem ve çeşitli hetero eklem yapılar üzerinde çalışılmıştır. Bu teknoloji 1983 e kadar Fahrenbruch ve Bube tarafından incelenmiştir [Fahrenbruch et al., 1983] ve CdS/CdTe gelecek vadeden bir yapı olarak görülmüştür. Üretilen küçük alanlı hücreler için son yıllarda elde edilen verimlerin %15-16 aralığında olduğu belirlenmiştir [Okeyama et al., 1997,Britt et al., 1993]. CdTe/CdS ince film güneş hücrelerinin en büyük avantajlarından birisi düşük maliyeli üretiminin yapılabilmesidir. Düşük maliyetli metotlar ile üretilen güneş hücrelerinin verimi %10-16 aralığındadır. CdTe'ün üretimi için kullanılan bazı düşük maliyetli üretim metotları; kapalı alan süblimasyon, sprey kaplama , film baskısı ve elektrokaplamadır. Bütün bu teknikler ile geniş alanlı üretim için söz konusu olabilmektedir. Çoğu yüksek verimli CdTe tabanlı heteroeklem yapılarda superstrat konfigürasyonu kullanılır. CdTe , CdS pencere tabakasının üzerine çöktürülür. Yapının içeriği cam/SnO_2/CdS/CdTe/arka kontak şeklindedir. Geçirgen iletken cam olarak SLG ya da borosilikat cam kullanılır. Cam katkılı SnO_2 ya da indiyum kalay oksit (İTO) ile kaplanır ve bu yapı substrat olarak kullanılır. Ardından çeşitli tekniklerle 0.05-0.1μm lik ince film CdS tabakası altlığın üzerine kaplanır. CSS ve CBD tekniklerinin her ikisi de yüksek verimli aletlerin üretiminde kullanılır. Daha sonra p tipi CdTe 1.5-3.0μm lik ince film olarak çeşitli metotlarla (CSS, ED, MOCVD, SP, PVD) CdS tabakasının üzerine kaplanır. Bütün bu tekniklerle elde edilen hücrelerin verimleri %10-16 aralığındadır. Bu tekniklerden CSS, ED ve SP geniş alanlı üretimlerde daha çok kullanılırlar. CdTe ün mikro yapısal ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesi için $CdCl_2$ ya da Cl içeren bileşikler ile tekrardan bir ısıl işleme tabi tutulması gerekmektedir. Yakın zamana kadar en yüksek dönüşüm verimi University of South Florida tarafından %15.8 olarak kaydedilmiştir. Daha yakın bir

zamanda ise Matsushita Battery Industrial Company of Japan adlı kuruluş tarafından AM1.5 altında CdS/CdTe güneş hücresi ultra ince 0.05μm CdS ve 3.5μm CdTe filmler sırasıyla MOCVD ve CSS teknikleri ile üretilmiştir ve elde edilen verim %16 olarak kaydedilmiştir. Tablo 3.7 de bazı kuruluşlar tarafından CdTe/CdS güneş hücresi ve modüllerinin üretim şekillerine bağlı alan ve verimlilikleri gösterilmiştir [Hamakawa, 2003].

Tablo 3.7 CdTe/CdS Güneş Hücresi Ve Modüllerinin Üretim Şekilleri, Alan, Verimlilikleri [Hamakawa, 2003]

CdTe çöktürme Prosesi	**Verim/Alan**	**Kuruluş**
CSS	%15.8/1.05cm^2	USF
	%9.1/6728cm^2/61.3W	Solar Cells, Inc
CSS	%16/1.0cm^2	Matsushita
Elektrokaplama	%14.2/0.02 cm^2	BP Solar
	%8.4/4540cm^2/28.2W	BP Solar
Atomik Tabaka Epitaksi	%14.0/0.12cm^2	Microchemistry
Screen painting	%12.8/0.78 cm^2	Matsushita
	%8.7/1200cm^2/10.0W	Matsushita
CSS	%15.8	NREL

3.4.3.3 Bakır İndiyum (Galyum) Diseleneid İnce Film Güneş Pilleri

CIS, CGS ve CIGS' ler tetragonal kristal yapıları sebebiyle kalkopritler olarak adlandırılırlar. Bu malzemeler çeşitli kompozisyonlarda üretilebilirler. Malzemeler üretilirken stikiyometri ve yapılan katkı değiştirildiğinde bu malzemelerin elektriksel iletkenlikleri de değişir. Bu güneş hücreleri üretilirken kompozisyonda Cu az miktarda olduğunda hücre p tipi iletken olur. Yapıda [Ga]/[In+Ga] oranına bağlı olarak CIGS'ın bant aralığı 1.04eV ile 1.68eV arasında değişir. Bant aralığı 1.20eV-1.25eV arasında olan yapılardan ise yüksek verim elde edilir. Bu yapılarda [Ga]/[In+Ga] oranı %20 ila %30 arasındadır. Daha yüksek bant aralığına sahip tabakaların bant aralığı yaklaşık 1.5eV e kadar çıkar. $CuInSe_2$ ve $CuInTe_2$ gibi diğer kalkopritlerin verimleri CIS a göre daha düşüktür [Razykov et al., 2011].

İlk CIS güneş hücresi %12 verime sahip tek kristal yapıda üretilmiştir [Wagner et al., 1974]. İlk ince film güneş hücresi ise %4 verimle 1976 yılında $CuInSe_2$ nin buharlaştırılması yöntemi ile üretilmiştir [Kazmerski et al., 1976]. CIS ince film teknolojisinde önemli gelişme Boeing Corporation (USA) tarafından gerçekleştirilmiştir. Cu, In, Se nin buharlaştırılması ile CIS üretimi yöntemi kullanılmıştır ve 1980 den 1982 ye elde edilen verim % 5.7 den %10 un üzerine çıkarılmıştır. Daha sonra ise Arco Solar tarafından 1987 de yapılan çalışmalar ile elde edilen verim %14 civarına kadar ulaştırılmıştır. Daha sonra ise Avrupa'daki EUROCIS konsorsiyumu ve USA NREL tarafından yapılan çalışmalar ile elde edilen verim % 19.5 olarak kaydedilmiştir [Ramanathan et al., 2003]. Bu değer tek eklem ince film güneş hücresi için elde edilmiş en yüksek verimdir. CIS modüllerinin ilk endüstriyel üretimi Arco Solar teknolojiye dayandırılarak Siemens tarafından gerçekleştirilmiştir. Würt Solar ve Global Solar gibi şirketler birlikte buharlaştırma yöntemi ile CIS modülleri geliştirmişlerdir. Tablo 3.8 de NREL tarafından yüksek verimli CIGS tabanlı bazı ince film güneş hücrelerinin alet yapısı ile birlikte verimleri ve alanları gösterilirken [Hamakawa, 2003] Tablo 3.9 de en iyi geniş alanlı çeşitli güneş modüllerinin verimleri, bu hücrelerden elde edilen güçler ve üretici firmalar gösterilmiştir [Razykov et al., 2011].

Tablo 3.8 CIGS tabanlı ince film güneş hücrelerinin yapısı, verimleri ve alanları [Hamakawa, 2003]

Alet Yapısı	**Verim (%)**	**Hücre Alanı (cm^2)**
ZnO/CdS/CIGS/Mo	18.8	0.449
ZnO/CdS/CIGS/Mo	17.7	0.414
ZnO/CIGS/Mo	15.0	0.462
ZnO/CdS/CIGS/Mo Mo kaplı paslanmaz çelik	17.4	0.414
ZnO/CdS/CIGS/Mo	13.7	43.89

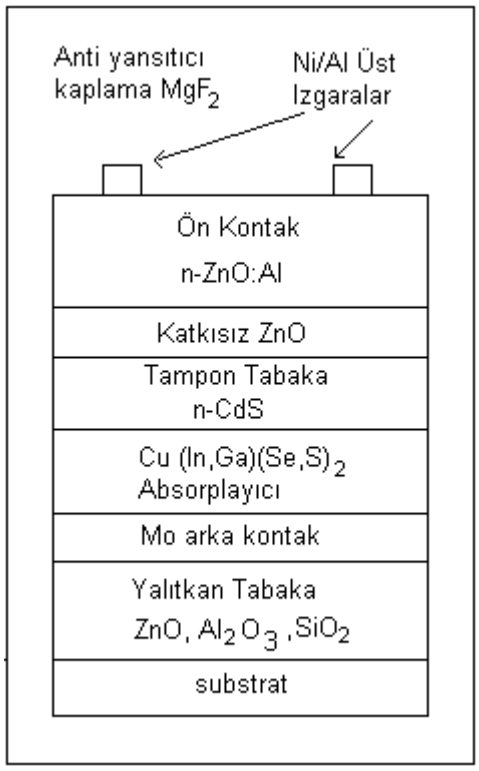
Tablo 3.9 En İyi Geniş Alanlı İnce Film Güneş Modülleri [Razykov et al., 2011]

Üretici Şirket	**Alet Yapısı**	**Boyut (cm^2)**	**Verim (%)**	**Güç(W)**
Mitsubishi Heavy	a-Si	15,625	6.4 (dengeli)	100
Global Solar Energy	CIGS	8709	10.2	88.9
Würth Solar	CIGS	6500	13	84.6
United Solar	a-Si	9276	7.6 (dengeli)	70.8
First Solar	CdTe	6624	10.2	67.4
Shell Solar GMBH	CIS	4938	13.1	64.8
Sharp	Nano-Si	4770	11 (dengeli)	52.5
Antec Solar	CdTe	6633	7.3	52.3
Kaneka	a-Si	8100	6.3 (dengeli)	51
Shell Solar Industries	CIS	3644	12.9	46.8
Showa Shell	CIGS	3459	13.4	46.45
EPV	a-Si	7432	5.7 (dengeli)	42.3

4.BAKIR INDIYUM GALYUM DİSELENEİD İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİ

4.1 CIGS Konfigürasyonu

CIGS güneş hücreleri substrat ve superstrat konfigürasyonda üretilebilir. Şekil 4.1 de substrat konfigürasyonda CIGS güneş hücresi gösterilmiştir [Kemell et al., 2005].



Şekil 4.1 Substrat konfigürasyonda CIGS güneş hücresi [Kemell et al., 2005]

Substrat konfigürasyonda üretilen hücre en yüksek verimi verir. Fakat substrat yapıda hücre yüzeyini korumak için hücre cam ya da kapsül tabakası içine alınmalıdır. Superstrat yapılar 1980 lerin başında incelenmiştir fakat verimlerinin %5 in altında olduğu görülmüştür. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda bu değer yaklaşık %13 e kadar çıkarılmıştır [Razykov et al., 2011].

4.1.1 Altlık Tabakası

Altlık olarak seçilen malzemenin vakum uyumluluğu olmalıdır. Altlık, CIGS üretiminin tavlama aşamasında vakumda tutulabilir. Bu durumda vakum uyumluluğu olan ve degas olmayan altlık seçimi yapılmalıdır [Kessler and Rudmann, 2004].

Güneş hücresinin bir katmanı olan yüksek verimli CIGS soğurucu yapısının büyütülmesi için kaplama işleminin son aşaması olan tavlama esnasında yapı sıcaklık yaklaşık 600 C civarına kadar ısıtılacaktır. Sıcaklık dayanımı 300 C den az olanlar ciddi bir şekilde bozulmaya uğrayacaklardır. Bu durumda üretilecek olan CIGS soğurucu kalitesi düşecek ve hücre performansı azalacaktır. Bu sebeple yüksek verim elde etmek için yeterli sıcaklılara izin verecek yüksek termal stabiliteye sahip altlıklar seçilmelidir [Kessler and Rudmann, 2004].

Güneş hücresinin bir katmanı olan difüzyon bariyeri tabakasının altlık üzerine kaplanması sırasında adhezyon problemleri yaşanmaması ve soğurucu yapı olan CIGS'ın üretiminde tavlama işlemi sırasında sıcaklığın artmasına bağlı olarak tabakaların genleşme farklarından dolayı oluşacak çatlaklara izin vermemek amacıyla seçilen altlık ve üzerine kaplanacak tabakaların termal genleşme katsayıları birbirleri ile uyumlu olmalıdır. Altlığın, sırasıyla üzerine kaplanacak difüzyon bariyeri, kontak tabakası ve soğurucu tabakasının termal genleşme katsayıları birbirleri ile uyumlu olabilmesi için bu değer $5\text{-}12x10^{-6}$ K^{-1} aralığında olmalıdır[Kessler and Rudmann, 2004].

Altlık güneş hücresinin üretimi boyunca yapılan işlemler hem de kullanım süresinde korozyona uğramamalı ayrıca soğurucu katman olan CIGS'ın kaplanma sürecinde selenyum ile reaksiyona girmemelidir. Seçilen altlığın üzerine difüzyon bariyeri kaplanmaya uygun olmalı ve yalnızca altlık olarak SLG seçimi yapıldığında SLG yapısında bulunan sodyumun soğurucu tabakaya geçmesi hariç hiçbir kirliliğin soğurucu yapıya geçmemesi gerekmektedir [Kessler and Rudmann, 2004].

Seçilen altlık çevresel etkilere karşı özellikle de su buharının yapıya nüfuz etmesinden uzun dönemde aktif soğurucu yapısını korumalıdır [Kessler and Rudmann, 2004].

Ayrıca altlık olarak seçilecek malzemenin yüzeyinin iki sebepten dolayı olabildiğince pürüzsüz olması gerekmektedir. Yüzey topografyasında meydana gelen değişikler ön ve arka kontak arasında deliklere sebep olur. Şönt meydana gelebilir ve bunu sebebi de yüzeye sıkışmış parçacıklardır. İkincisi ise kirliliklerin difüzyonunu engelleyecek bariyer tabakasının ya da yalıtkan tabakanın pürüzsüz yüzeye sahip altlık üzerine kaplanması daha kolay ve daha iyi olacaktır. Bu sebeplerle altlık yüzeyleri mekanik olarak düzleştirilmeli ya da elektro parlatma yapılmalıdır. Standart ticari metal levhalar için pürüzlülük değeri maksimum 2µm olarak belirlenmiştir [Kessler and Rudmann, 2004].

Seçilecek ideal altlık ucuz, bulunabilmesi kolay ve hafif olmalıdır. Üretimi için az enerji harcanmalıdır [Kessler and Rudmann, 2004].

4.1.1.1 Esnek Olmayan Altlık Malzemeleri

4.1.1.1.1 Soda Kireç Camı

Soda kireç cam çoğu zaman pencere camlarında, meyve suyu ve reçel gibi ürünleri muhafaza etmek için hazırlanan kaplarda kullanılan bir cam türüdür. Soda lime cam sodyum karbonat, kireç, kalsiyum ve magnezyumlu taş, silikon dioksit, alüminyum oksit, sodyum sülfat, sodyum klorür gibi ham malzemelerin bölgesel olarak 1675 C ye kadar cam fırınlar içinde eritilmesiyle üretilir. Soda lime camlar teknik olarak pencerelerde ve çeşitli kaplarda kullanılan camlar olarak ayrılabilirler. Pencereler için kullanılan camların sodyum oksit ve magnezyum oksit içeriği daha fazla iken silika, kalsiyum oksit ve alüminyum oksit içeriği ise daha azdır. Bu durumda yiyecek ve içecekleri muhafaza etmek için kullanılan camların kimyasal dayanıklılığı daha yüksektir. Soda kireç camların hafif ve 30 µm den düşük kalınlıklarda üretimi mümkün olması ile ince film fotovoltatiklerinin üretiminde altlık olarak kullanıma uygun bir malzemedir. Ayrıca yapısındaki sodyum oluşturulan güneş hücresinin soğurucu tabakası olan CIGS yapısına üretimin bir basamağı olan tavlama işleminde difüze olmaktadır ve bu CIGS yapısının verimini arttırıcı bir etkendir. Soda kireç camının altlık olarak kullanıldığı güneş hücrelerinde verim %19,2 olarak elde edilmiştir [Ramanathan et al., 2003]. Ayrıca soda kireç

camı düşük maliyetli ve geniş alanda üretim yapılması için uygun bir malzemedir. Soda kireç camının bazı özellikleri tablo 5.1 de gösterilmiştir [Kessler and Rudmann 2004 ,Herz et al., 2003].

Tablo 4.1 Soda Kireç Camının Bazı Özellikleri
[Kessler and Rudmann 2004 ,Herz et al., 2003]

Altlık	**CTE (10^{-6} K^{-1})**	**Yoğunluk (g/cm^3)**	**Yüzey Pürüzlülüğü (nm)**	**Tmaksimum (^0C)**
Soda Kireç Camı	~9	4,5	10-15	550

4.1.1.2 Esnek Altlık Malzemeleri

CIGS soğurucu yapısına sahip güneş hücrelerinin üretiminde altlık olarak seçilebilecek en uygun esnek malzemeler metaller ve polimerlerdir. Bu malzemelerin seçiminde en önemli kriterler sahip oldukları termal genleşme katsayıları, yeterli kimyasal ve termal dirençtir. Esnek altlık olarak seçilmiş ve test edilmiş bazı metaller östenitik, ferritik krom çelikleri, titanyum, molibden, alüminyum ve bazı alaşımlardır.

4.1.1.2.1 Polimerler

CIGS soğurucu yapısına sahip güneş hücrelerinin üretiminde altlık olarak seçilebilecek en uygun esnek malzemelerden biri polyimidedir. Polyimide ısı ile sertleşen bir polimer cinsidir.Bu polimerlerin 400 ^0C ve üzerindeki sıcaklıklara dayanıklılıkları vardır [Kessler and Rudmann, 2004]. Ayrıca yüksek kimyasal dirence ve mekanik özelliklere sahiptirler. Hafif ve yalıtkan olmalarının yanında metallere kıyasla daha pürüzsüz bir yüzeyleri vardır. Vakum işlemi için de uygundurlar. Esnek altlık malzemesi olarak kullanım için tüm bu avantajların yanı sıra termal genleşme katsayılarının oldukça yüksek olması bu malzemeyi altlık olarak kullanım için uygun kılmaz. Polyimide'lerin Kapton, Upilex gibi cinsleri vardır [Kessler and Rudmann, 2004].

Tablo 4.2 Polyimide'lerin Bazı Özellikleri [Kessler and Rudmann, 2004]

Altlık Malzemesi	**CTE (10^{-6} K^{-1})**	**Tmaksimum (^{0}C)**
Kapton	17 (20-200^{0}C)	< 500
Upilex	12-24 (20-400^{0}C)	< 500

4.1.1.2.2 Metaller

CIGS soğurucu yapısına sahip güneş hücrelerinin üretiminde altlık olarak seçilebilecek en uygun esnek malzemelerden biri metallerdir. Fiziksel ve kimyasal gereksinimler göze alındığında birçok çeşit metal altlık olarak kullanıma uygundur. Östenitik çelikler, ferritik krom çelikleri, titanyum, molibden, alüminyum ve bazı alaşımlar bunlara örnektir [Kessler and Rudmann, 2004]. Metal folyoların avantajı yüksek mekanik ve 600 ^{0}C yi geçen yüksek termal stabiliteye sahip olmalarıdır, fakat bunun yanı sıra soğurucu yapı olan CIGS'ın oluşum aşamalarından biri olan tavlama işlemi esnasında sıcaklığın artması ile metal içindeki demir ve benzeri yapıların CIGS soğurucu yapısına geçerek yapıyı bozmasını bastırmak amacıyla bir difüzyon bariyerine ihtiyaçları vardır. Ferritik krom çeliklerinin düşük maliyetli ve titanyumun hafif olması bu metalleri uygun adaylar kılar. Fakat alüminyum folyo ve östenitik çelikler yüksek termal genleşme katsayısına sahip oldukları için soğurucu yapı olan CIGS e adhezyonlarında problem yaşanır bu durum altlık olarak kullanılmaları için bir dezavantajdır. Tablo 5.3 de bazı metallerin özellikleri gösterilmiştir [Kessler and Rudmann, 2004].

Tablo 4.3 Bazı Metallerin Özellikleri [Kessler and Rudmann, 2004]

Altlık Malzemesi	**CTE (10^{-6} K^{-1})**	**Tmaksimum (^{o}C)**	**Maliyet**
Titanyum	8.4	>600	Yüksek
Alüminyum	22	600	Düşük
Molibden	4.8-5.9	>600	Yüksek
Paslanmaz Çelik AISI 304	17.2	~500	Düşük
Paslanmaz Çelik AISI 409	11.7	~800	Düşük
Paslanmaz Çelik AISI 430	10.4	~850	Düşük

Ferritik çeliklerin ise diğer adaylara kıyasla birçok avantajı vardır. Ferritik çeliklerde krom miktarı yüksek (%16-25) olduğu için diğer çeliklere göre korozyon dirençleri daha büyüktür. Ferritik çeliklerin bazılarında bulunan Mo ve Ta ısıya dayanıklı malzemelerdir. Mo ferrit oluşumunda etkili olurken yüksek sıcaklıklarda çeliğin daha dayanıklı olmasını sağlar. Yine ferritik çeliklerin yapısında bulunan niobyum ve titanyum taneler arasındaki korozyon hassasiyetini azaltmak amacıyla karbonla birleşerek karbür oluşturması için yapıda bulunur ve ferrit oluşumuna katkıda bulunur. Ferritik çeliklerin östenitik çeliklere kıyasla tercih edilmelerinin bir sebebi de östenitik çeliklerde daha çok ferritik çeliklerde ise daha az nikel elementinin bulunmasıdır. Nikel elementi soğurucu yapı olan CIGS'ın üretim işlemlerinden biri olan tavlama esnasında sıcaklığın artması ile CIGS yapısına difüze olarak selenyum ile reaksiyona girer ve CIGS'ın yapısını bozar. Altlık olarak kullanılabilecek birkaç ferritik çeliğin özellikleri tablo 5.4 de gösterilmiştir [efunda, 2011]

4.1.2 Elektriksel Yalıtkan Tabaka

Altlık olarak seçilen metallerin yapısında Fe ve diğer impüritelerin CIGS e difüzyonunu kompanse etmek için bariyer tabakasına ihtiyaç vardır. CIGS'ın oluşumunun bir basmağı olan tavlama esnasında yapının sıcaklığı artacaktır dolayısıyla seçilen altlığın sıcaklığı da artacak bu durumda altlıktaki impüritelerin difüzyon hızı artacak ve termal gerilimde artacaktır bu sebeple difüzyon bariyeri ve yalıtkan tabaka ihtiyacı da fazlalaşacaktır [Kessler et al., 2004]. İletken altlıklar üzerine monolitik olarak entegre modüllerin üretimi ince, esnek bir dielektrik tabakası tarafından elektriksel bir yalıtım gerektirir. Bu gereksinim difüzyon bariyeri gereksiniminden daha büyüktür [Kessler and Rudmann, 2004]. Yalıtkan tabakalar normalde iyi bir difüzyon bariyeridir fakat difüzyon bariyeri iyi bir yalıtkan tabaka olmayabilir. Yalıtkan tabakalar selenyum atmosferinde yüksek sıcaklıkta çatlak oluşumuna karşı koyarlar ve yalıtkanlık özelliklerini kaybetmezler [Kessler and Rudmann, 2004].

Termal genleşme ile oluşabilecek çatlaklardan kaçınmak için seçilen altlık tabakası ile üzerine kaplanacak yalıtkan tabakanın CTE si uyumlu olmalıdır [Kessler and Rudmann, 2004]. Ayrıca yalıtkan tabakanın çok katmanlı olarak kaplanması herhangi bir delik oluşumunu da engelleyecektir [Schuisky, 2011].

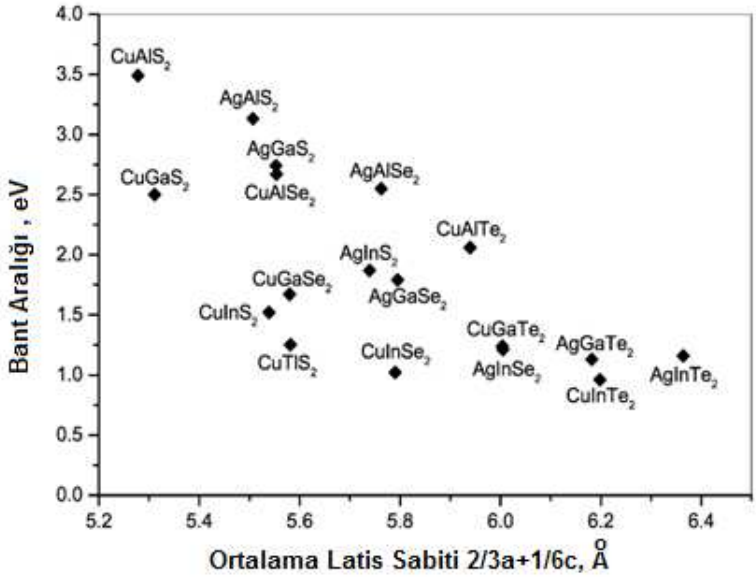
Yalıtkan tabaka olarak uygulanabilecek tabakalar SiO_2, SiO_x , SiO_x:Na, Al_2O_3, ZnO dir [Shi et al., 2009]. Bu tabakalar altlıkların pürüzlülük değerlerine göre 1-3µm kalınlığında altlık üzerine uygulanabilirler. Yalıtkan tabakalar çeşitli yöntemlerle kaplanabilirler. Sol gel yöntemi, fiziksel buhar kaplama, plasma iyileştirmeli kimyasal buhar kaplama, sprey yöntemleri ve elektron demeti buharlaştırma yöntemleridir [Schuisky, 2011].

4.1.3 Elektriksel Arka Kontak

Substrat yapıdaki CIGS güneş hücreleri cam, metal ve polimer üzerine kaplanabilir. Molibden altlık üzerine püskürtme ya da epitaksiyel demet buharlaştırma ile kaplanır ve çoğu zaman CIGS güneş hücreleri için elektriksel arka kontak malzemesi olarak kullanılır. CIGS Mo üzerine kaplandığında $MoSe_2$ ara yüzey tabakası otomatik olarak oluşur ve bu tabaka CIGS ile Mo arasında omik iletime yardımcı olur [Razykov et al., 2011].

4.1.4 Soğurucu Tabaka

Genel olarak CIGS güneş hücrelerinin bant aralığı 1.5eV civarındadır [Konolov, 2004]. Bu da fotovoltatik uygulamalar için ideal bir malzeme olmalarını sağlar. Şekil 4.2 de bazı kalkopirt yarıiletkenlerin bant aralığı ve ortalama örgü sabiti ilişkisi verilmiştir [Konolov, 2004].



Şekil 4.2 Kalkopirt yarıiletkenlerin bant aralığı ve ortalama latis sabiti ilişkisi [Konolov, 2004]

CIGS güneş hücresinde soğurucu tabakanın yüksek soğurma katsayısına sahip olması sebebiyle gelen maksimum ışımanın soğrulması için bu tabakanın 2-3µm kalınlığında olması yeterlidir [Niki et al., 2010]. CIGS kalkoprit yapının direkt bant aralığının olması da fotovoltatik uygulamalarda soğurucu olarak kullanılmasına olanak sağlayan bir özelliktir. CIGS soğurucu tabakaları çeşitli kaplama yöntemleri ile büyütülebilir. Yapının tane boyutu ve morfolojisi kullanılan kaplama yöntemine bağlıdır. Kullanılan farklı yöntemlerle %13 ü aşan verim elde edilmiştir. Yüksek verimli Cu (In,Ga)Se_2 fazı p tipidir, fakat kusurlu kalkoprit ince bir tabaka olan Cu $(In.Ga)_3Se_5$ fazı en üst yüzeyde ayrıdır ve tampon tabakadan difüze olan katyon atomları ile katkılandırıldığı zaman n tipidir.

4.1.5 Tampon Tabaka

n tipi iletkenliğe sahip, bant aralığı 2.0 - 3.4 eV aralığında olan çeşitli yarı iletkenler hetero eklem oluşturmak üzere CIGS hücrelerinde tampon tabaka olarak kullanılır. CdS de tampon tabakası olarak kullanılan bir yarıiletkendir ve hücrenin yüksek verime sahip olmasında önemli bir etkendir. CdS çoğu zaman yüksek verimli CIGS hücrelerinde CBD yöntemi ile büyütülür. Bu proses düşük maliyetli ve geniş alanlıdır. PVD ile büyütülmüş CdS tabakaları daha düşük verimli hücrelerin oluşumuna sebebiyet verir. In_2S_3, ZnO, ZnS ve ZnSe gibi tampon tabaka olarak kullanılabilecek çeşitli alternatif malzemelerdir ve PVD, RF, MOCVD, ALD ve ILGAR gibi yöntemlerle üretilebilirler [Chaisitsak et al., 2001, Ohtake et al., 1995, Bhattacharya et al., 2004, Spiering et al., 2003].

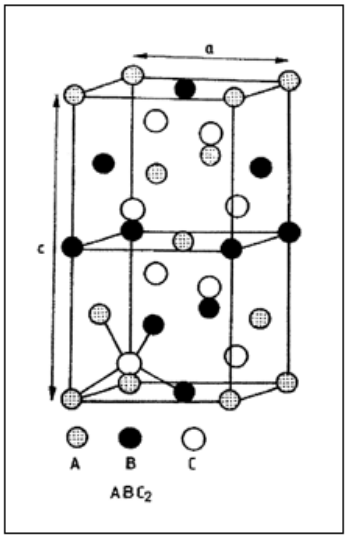
4.1.6 Ön Elektriksel Kontak

Bant aralığı 3 eV nin üzerinde ve optik geçirgenliği %85 in üzerinde olan malzemeler ön elektriksel kontak olarak kullanıma uygundur [Wang et al., 2009]. Bugün CIS güneş hücreleri için ITO, RF püskürtme ile üretilen Al katkılı ZnO tabakası elektriksel ön kontak olarak kullanılmaktadır. Çoğu zaman ZnO ve katkılı ZnO tabakasının kombinasyonu kullanılır. Bu çift tabaka sayesinde daha yüksek verim elde edilir. Boron da elektriksel ön kontak olarak kullanıma uygun bir

alternatiftir çünkü yük taşıyıcılarının mobilitesinin yüksek olmasını ve daha uzun dalga boylu spektral bölgede daha yüksek geçirgenliğin olmasını sağlar.

4.2 Soğurucu Materyalin Kristal Yapısı ve Bant Aralığı

Üçlü Cu kalkogendileri çoğu zaman tetragonal kalkoprit yapıda kristalleşir [International Centre for Diffraction Data, 2011]. Kalkoprit CIGS'ın kristal yapısı şekil 4.3 de gösterilmiştir [Merino et al., 1996]. Burada A atomları Cu, B atomları In ve C atomları Se u ifade eder.



Şekil 4.3 Kalkoprit CIGS ın kristal yapısı [Merino et al., 1996]

$CuInSe_2$ nin bant aralığı 1.04eV kadardır. Bu değer bir miktar In un yerine Ga ve bir miktar da Se un yerine S konulduğunda güneş spektrumu ile daha uyumlu olacak şekilde ayarlanabilir. Malzeme sisteminin esnekliği bant aralığı değerlerinin çeşitliliğine olanak sağlar. Yapılan çalışmalarda $CuInSe_2$ için 1.04 eV, $CuInS_2$ için 1.53eV, $CuGaSe_2$ için 1.7eV ve $CuGaS_2$ için de 2.5eV olarak belirlenmiştir [Birkmire, 2001]**.**

4.3 CIGS da Stabilite ve Kusurlar

Güneş hücrelerinin dönüşüm veriminin yanında stabilitesi de çok önemlidir. Çünkü her ikisinin de elektrik üretimi üzerinde etkisi vardır. CIGS güneş hücresinin karmaşık yapısına rağmen normal işlem koşulları altında son derece stabil bir performans sergilerler [Schock and Noufi, 2000, Kojima et al., 1998] Bunun yanı sıra X ışınımı [Tringe et al., 2002] elektron ışınımı [Jasenek et al., 2001,Yamaguchi, 1995] ya da proton ışınımı [Jasenek and Rau, 2001, Kawakita et al., 2002., Boden et al., 2000] gibi zor koşullar altında da bu stabil performansı gösterirler.

4.3.1 Kusur Kimyası

CIS tabanlı güneş hücreleri soğurucuları için elektriksel ve kimyasal stabilite önemlidir. Enerjik olarak en çok tercih edilen nokta kusuru bakır boşluğudur. V_{Cu} sığ akseptör CIS a p tipi katkı yeteneği sağlar. En önemli kusur kompleksi ise $2V_{Cu}+In_{Cu}$ dur. Bu kusur In zengin malzemede dejenerasyonu engeller. Yalıtılmış In_{Cu} derin bir donör olabilir fakat $2V_{Cu}+In_{Cu}$ kusur kompleksi derin seviyeleri yoktur ve elektriksel olarak nötrüdür. $CuIn_3Se_5$ ve $CuIn_5Se_8$ gibi düzenli boşluklu bileşikler (OVC) periyodik olarak tekrar eden $2V_{Cu}+In_{Cu}$ birimi ile açıklanabilir. Diğer kusurların varlığı da söz konusu olabilir fakat onların oluşum enerjisi daha yüksektir [Zhang et al., 1998]. CIS a Ga eklendiği zaman $2V_{Cu}+Ga_{Cu}$ kusur kompleksi daha az kararlı olur. Bu sebeple CGS de OVC nin oluşumu CIS ya da çok az Ga içeren CIGS a göre daha zordur [Wei et al., 1998].

4.3.2 Yarı Kararlı Davranış

CIGS güneş hücreleri açık devre voltajını arttırıcı yönde ve aydınlanma altında dolum faktörünü geliştirici yönde elektriksel yarı kararlılık sergilerler. Aydınlanma ile olan bu yarı kararlılık hem soğurucuda hem de CIGS/CdS ara yüzeyinde meydana gelebilir. Bu durum aydınlanmanın dalga boyuna bağlıdır [Guillemoles et al., 2000,Zaiberowski et al., 2001]. Uzun dalga boylu aydınlanma (kırmızı ışık) ile meydana gelen etkiler CIGS absorplayıcı tabakası ile ilişkilidir. Çünkü düşük enerjili

kırmızı ışık genellikle CIGS tarafından emilir. Kırmızı ışık ile aydınlanma net taşıyıcı konsantrasyonunun yarı kararlılığını arttırmaya sebep olurken soğurucudaki uzay yükleri tabakasının genişliği azalır. Uzay yük tabakasındaki azalan rekombinasyon sebebiyle açık devre voltajı artar. Böylelikle aydınlanma ile açık devre voltajının artışı ile CIGS absorplayıcı tabaka arasında ilişki görülür. Kısa dalga boylu aydınlanma (mavi ışık) CdS/CIGS ara yüzeyine ya da bu ara yüzeyin yakınına etki eder. Mavi ışık ile yapılan aydınlanma ile dolum faktörünün arttığı belirlenmiştir. Aydınlanma üzerinde dolum faktörünün gelişimi CIGS/CdS ara yüzeyi ile ilişkilidir. Aydınlanma indüklü kusur reaksiyonları aletin performansı bakımından fayda sağlayıcıdır. Bunun yanında alet karanlıkta tutulduğu zaman bu etkiler kaybolur.

4.4 CI(G)S Üretim Yöntemleri

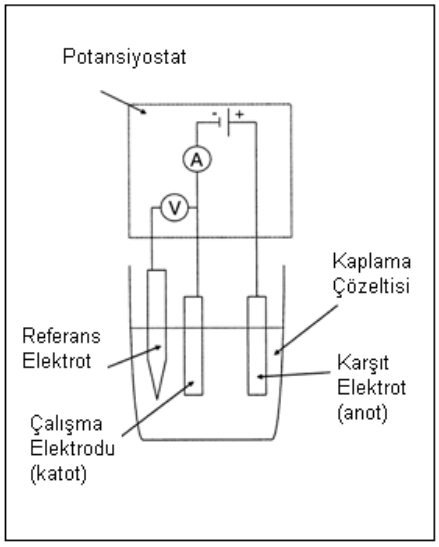
CI(G)S ince film güneş hücrelerinin üretimi için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar Metalik öncül tabakaların selenizasyonu, bileşik kaynaklardan buharlaştırma, kapalı alanda buhar Taşınımı, sprey Piroliz, öncüllerin çöktürülmesi için düşük sıcaklık sıvı faz, tanecikli öncül tabakaların kalkojenizasyonu ve elektrokaplama yöntemleridir. Altlık hazırlama işleminin ardından elektrokaplama yöntemi ile CI(G)S ince filmler hazırlanacaktır. Bunun için elektrokaplama yöntemini özet olarak açıklayalım.

$CuInSe_2$ ince film güneş hücreleri oluşturmanın bir yöntemi de elektrokaplamadır. Elektrokaplama yöntemi ile elde edilen $CuInSe_2$ filmlerin verimleri literatürde yapılan bir çalışmada %7,9 olarak kaydedilmiştir [Fernandez et al., 1996]. Yapıya Ga un eklenmesi ve büyütme tekniklerinin (elektrokaplama ve elementlerin beraber buharlaştırılması) kombinasyonu ile elde edilen verim %14,1 e kadar çıkarılmıştır [Bhattacharya et al., 1998]. Son zamanlarda ise " National Center for Photovoltatics" tarafından yayınlanan bildiride vakumda buharlaştırılmış $CuInGaSe_2$ tabanlı güneş hücreleri için verim değeri %18,1 olarak kaydedilmiştir [Contreras et al., 1999]. Elektrokaplama prosesi düşük maliyetli filmlerin oluşturulması için uygun bir yöntemdir. Elektrokaplama yönteminin bazı avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

1. Geniş alanlı filmlerin üretimine olanak sağlar.
2. Yüksek kalitede film oluşumuna olanak sağlarken üretim maliyeti de beraberinde düşük tutulmaktadır.
3. Düşük maliyetli fakat yüksek hızlı gerçekleştirilen bir prosestir.
4. Düşük maliyetli başlangıç malzemeleri (düşük saflıkta tuzlar ve çözücüler gibi) kullanımına uygundur.
5. Uygun banyo şartları yakalandığında devam ede gelen bir süreçtir.
6. Çok bileşenli hücrelerin üretimine olanak sağlar.
7. Kaplama banyolarında düşük sıcaklıkta proses gerçekleştirilir.
8. Kaplanan filmler çeşitli şekil ve formlarda olabilmektedir.
9. Kaplama hızı bir takım parametrelerle kontrol edilebilmektedir.
10. Kaplama tamamlandığında çözelti geri dönüşümlü olabileceğinden minimum atık oluşur.

Elektrokaplama izotermal bir prosestir bu prosesle üretilen filmin kalınlığı, morfolojisi ve kompozisyonu elektriksel parametrelerle belirlenebilir. Bu yöntemde elektriksel akım yoğunluğu, kaplama banyosunun koşulları (sıcaklık, pH banyo bileşenlerinin kompozisyonları kullanılan kompleks yapıcı ajanlar) ve tavlama koşulları (süre, uygulan sıcaklık ve atmosfer koşulları) oluşan CI(G)S filmlerin özelliklerini etkileyen faktörlerdir. Bu yöntemde sistem üçlü elektrot, potansiyostat ve kimyasalların içinde bulunduğu kaplama çözeltisinden oluşur. Üçlü elektrot sistemi referans elektrot, çalışma elektrodu ve karşıt elektrottan oluşur. Referans elektrot gerilimi ölçmek için kullanılan bir elektrottur. Referans elektrodun potansiyeli kesinlikle bilinmelidir ve kaplama sırasında bu değer sabit kalmalıdır. Referans elektrottan akım akışına izin verilmez. Referans elektrot olarak SHE, SCE ve Ag/AgCl elektrotları kullanılabilir. Çalışma elektrodu sistemde katot olarak kullanılan elektrottur. İlgilenilen indirgenme reaksiyonları bu elektrotta gerçekleşir. Membran, karbon elektrotlar $Zn/ZnSO_4$, $Cu/CuSO_4$, Au/Pt çalışma elektrodu olarak kullanılabilirler. Çalışma elektroduna elektron verdiğimizde oluşan gerilimi düşürebiliriz. Karşıt elektrot ise sistemde anot olarak kullanılan elektrottur. Pt ve Au karşıt elektrot olarak kullanılabilir. Bu elektrotta yükseltgenme reaksiyonları meydana gelir ve elektronlar açığa çıkar. Bu elektrodun gerilimini arttırmak için elektroda elektron veririz. Potansiyostat ise çalışma elektrodunun referans elektroda

göre potansiyelini ölçer ve kontrol eder. Amaç önceden belirlenen ve ölçülen potansiyel arasındaki farkı minimize etmektir. Bu da çalışma ve karşıt elektrot arasındaki akan akımın ayarlanması ile elde edilir. Elektrokaplama sistemi şekil 4.4 de şematize edilmiştir [Kemell et al., 2005].



Şekil 4.4 Elektrokaplama sistemi [Contreras et al., 1999]

Elektrokaplama yöntemiyle oluşturulan $CuInSe_2$ filmlerin özelliklerini etkileyen önemli parametreler vardır. Bunlar elektriksel akım yoğunluğu, kompozisyon, kaplama banyosunun sıcaklık, pH gibi işlem koşulları ve tavlama koşullarıdır. $CuInSe_2$ 'nin elektrokaplama koşulları temel olarak Cu, In ve Se nin kaplanması için bir takım elektrokimyasal reaksiyonları ve bunların ilgili Nerst denklemlerini temel alır. Bu indirgenme ve Nerst denklemleri literatürde şu şekilde ifade edilmiştir [94].

$$Cu^{+2} + 2e^{-} \leftrightarrow Cu(s) \tag{4.1}$$

$$E = E^{0}_{Cu} + RT/2Fln(a^{+2}_{Cu}/a_{Cu}) = 0.10 + 0.0295log(a^{+2}_{Cu}/a_{Cu}) \tag{4.2}$$

$$In^{+2} + 3e^{-} \leftrightarrow In(s) \tag{4.3}$$

$$E = E^{0}_{In} + RT/3Fln(a^{+3}_{In}/a_{In}) = -0.58 + 0.0197log(a^{+3}_{In}/a_{In}) \tag{4.4}$$

$$HSeO^{+}_{2} + 4H^{+} + 4e^{-} + OH^{-} \leftrightarrow H_2SeO_3 + 4H^{+} + 4e^{-} \leftrightarrow Se(s) + 3H_2O \tag{4.5}$$

$$E = E_{Se}^{0} + RT/4Fln(a_{HSeO2}^{+}/a_{Se}) + \left(\frac{3RT}{4F}\right) lnC_{H+} =$$
$$0.50 + 0.0148log(a_{HSeO2}^{+}/a_{Se}) - 0.0433pH \quad (4.6)$$

Üçlü CIS bileşiminin direkt elektrokaplaması bir miktar zordur. Çünkü koşullar bir bileşenin kaplanması için uygunken bir diğerinin kaplanması için daha farklı olabilir [Ugartea et al., 1998]. Bu zorluklardan birisi denge potansiyellerinin yukarındaki denklem (4.1) (4.3) ve (4.6) dan görüldüğü üzere farklı olmasıdır. Bu durumda Cu, In ve Se un potansiyellerini birbirine yaklaştırmak için elektrolite kompleks yapıcı ajanlar eklenmiştir. Sitrat iyonları ve triethanolamine CIS'ın elektrokimyasal olarak kaplanması için en bilinen kompleks yapıcı ajanlardır [Ugartea et al., 1998]. Bunların dışında literatürde sık kullanılan bir başka kompleks yapıcı ajan da ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) olarak kaydedilmiştir [Pern et al., 1991]. EDTA varlığının film üzerindeki etkisi incelenmiş ve EDTA kullanılan kaplama banyolarından oluşturulan filmlerde fotoakım yoğunluğunun daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [Ugartea et al., 1998]. Elektrokaplama banyolarında kullanılan çözücünün önemi de bir takım çalışmalar yapılarak gözlemlenmiştir. Örneğin sulu kaplama banyolarında In ve Ga un verimleri H^{+} nın indirgenmesi ile sınırlanmaktadır. Böyle olduğunda da kompozisyonda homojenitenin bozulması meydana gelir ve bu sebeple de hücrenin verimi sınırlanır. Bundan dolayı kaplama banyosunda suya alternatif olarak alkol kullanımı düşünülmüştür. Alkol çözeltisinin geniş bir elektrokimyasal pencere sağladığı ve yüzey modifiye edici özelliği olduğu yapılan çalışmalar ile gözlemlenmiştir [Long et al., 2009]. Yine kaplama banyolarında kullanılan çözücüler üzerinde yapılan çalışmalar oda sıcaklığındaki iyonik sıvılar üzerine durulmasına neden olmuştur. Bu sıvıların genel adı RITL olarak bilinir. Bu sıvıların kaplama banyolarında kullanılmasının bir takım avantajlar sağladığı yapılan çalışmalarla gözlemlenmiştir. Bu avantajları sıralayacak olursak:

1. RITL geniş bir elektrokimyasal pencereye sahiptir Bu değer 6V u aşar. Oysaki su da 1.23V ve DMSO da ise 4.3V kadardır.
2. RITL ler yüksek termal stabiliteye sahiptirler. Bu sıcaklık değeri RITL için 300 ^{0}C iken su için 100^{0} C DMSO içinse 189^{0}C'dir.
3. RITL'lerin çok düşük buhar basıncı vardır.
4. RITL ler düşük toksik özelliktedir.

5. RITL ler içinde organik ve inorganik malzemelerin çözünülebilirliği iyidir.
6. RITL ler havada ve su da kararlıdırlar.
7. RITL ler elektrokimyasal uygulamalar için gerekli olan yüksek iletkenliğe sahiptirler.

RITL ler yukarıda sıraladığımız 1. ve 2. avantajları sayesinde kaplama banyolarında verimliliğin artmasına olanak sağlarlar [Shivagan et al., 2007].

Kaplama prosesinin ardından gerçekleştirilen termal tavlama işlemi kalkopirit yapıda çatlakları olmayan ya da çok az olan, iyi kompakt yapıda düzgün tane boyutuna sahip CIGS filmlerin üretimi için gerekli bir prosestir. Selenizasyon süresinin ve sıcaklığının CIGS film üzerindeki etkisi büyüktür. Selenizasyon süresi sabit tutulduğunda aşırı yüksek selenizasyon sıcaklığı CIGS filmin yüzey morfolojisi üzerinde zarar verici etki yapar. Bu sebeple yüksek verimli CIGS güneş hücreleri için selenizasyon sıcaklığının ve süresinin uygun seçilmesi çok önemlidir. Selenizasyon süresi filmin kalınlığına yapısına ve kompozisyonuna bağlı bir parametredir. Genellikle selenizasyon prosesi turbo fırın kullanılarak yapılır. Se atmosferinde 500-550 ^{0}C lerdeki sıcaklıklarda 1 saat civarında tavlama prosesi gerçekleştirilir. Yapılan çalışmalarda CIGS ince film güneş hücresinden selenyum kaçışını engellemek için fazla selenyum tozunun selenyum kaynağı olarak çok zehirli olan H_2Se gazı yerine ısıl işlem sırasında eklenebileceği görülmüştür [Donglin et al., 2008].

Elektrokaplama ile üretilen filmlerin kompozisyonu uygulanan katodik potansiyel ve elektrolitteki elementlerin konsantrasyonları ile belirlenir. Üretilen filmlerin bulk yapıları ve stikiyometrik özellikleri ise XRD, XRF, XPS ve GDOES ile belirlenirken filmlerin yüzey özellikleri ve morfolojileri ise SEM ile belirlenir.

5. DENEYSEL MATERYAL VE METOD

Bu deneysel çalışmada yüksek korozyon dirençleri, yüksek termal stabiliteleri, düşük yüzey pürüzlülükleri, uygun maliyetleri ve uygun termal genleşme katsayıları sebebiyle seçilen paslanmaz çeliklerden AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 altlık malzemesi olarak kullanılmışlardır. Tablo 5.1 de deneyde kullanılan paslanmaz çeliklerin her birine ait malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1 Bazı Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri

Özellik	**AISI 409**		**AISI 430**		**AISI 304**	
	Element	**Ağırlık(%)**	**Element**	**Ağırlık(%)**	**Element**	**Ağırlık(%)**
	C	0.08	C	0.12	C	0.08
	Mn	1.00	Mn	1.00	Mn	2.00
	Si	1.00	Si	1.00	Si	1.00
	Cr	10.5-11.75	Cr	16-18	Cr	18-20
	P	0.045	P	0.040	P	0.045
	S	0.045	S	0.030	S	0.030
	Ti	0.48-0.75	Ti	Yok	Ti	Yok
	Mo	Yok	Mo	Yok	Mo	Yok
	Nb+Ta	yok	Nb+Ta	yok	Nb+Ta	Yok
Yoğunluk (kg/m^3)	7.8x1000 (25^0C)		7.8x1000 (25^0C)		8x1000 (25^0C)	
Gerilme Direnci Mpa	450 (25^oC)		480 (25^oC)		515 (25^oC)	
Akma Dayanımı Mpa	240 tavlanmış		275 Tavlanmış, sıcak b.		205	
Termal Genleşme ($10^{-6}/^o$C)	11.7 (0-100 ^{o}C)		10.4 (0-100 ^{o}C ve üzeri)		17.2 (0-100 ^{o}C ve üzeri)	
Termal İletkenlik (W/m-K)	24.9 (95 ^{o}C ve üzeri)		26.1 (100 ^{o}C ve üzeri)		16.2 (0-100 ^{o}C ve üzeri)	
Sıcaklık Dayanımı	800^{o}C		800 ^{o}C ye sürekli 850 ^{o}C ye kesikli		500^{o}C	
Kalınlık (mm)	0.4		0.4		0.05	

5.1 Seçilen Altlık Malzemelerinin Hazırlanması ve Analiz İçin Temizleme İşlemi

Altlık olarak seçilen AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonlarını ,yüzey pürüzlülüklerini, yüzey morfolojilerini ve yapılarındaki kristal fazları belirlemek amacıyla sırasıyla yapılacak olan spektral analiz, AFM analizi, SEM Analizi ve XRD analizleri uygulanmıştır. Her bir örnekten her analiz için belirlenmiş belli boyutlarda hazırlanan örnekler temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Temzileme işleminde örnekler 50 ml aseton ve 50 ml etanol karışımından oluşan çözelti içine atılarak ortalama 25^{o}C sıcaklıkta 45 dakika ultrasonik banyoda tutulmuştur. Ardından 45 dakika 100^{o}C de etüvde tutularak Kurutulmuştur. Temizlenen örneklerin Spektral analiz , AFM analizi , SEM analizi ve XRD analizleri için hazır hale getirilmiştir.

5.2 Uygulanan Analiz Metodları

5.2.1 Spektral Analiz

Altlık olarak seçilen AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 paslanmaz çelik örneklerinin kimyasal kompozisyonun kütlece % miktarlarının ortalama değerlerinin belirlenmesi amacıyla oda sıcaklığında Spektromaxx cihazı ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için 22x22 mm boyutlarında hassas kesicide kesilen paslanmaz çelikler temizleme işleminden sonra spektral analiz ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarına göre, bu değerler literatürde belirtilen teorik değerler ile karşılaştırılmış ve denklem (5.1) yardımıyla hata payları hesaplanmış ve tablo haline getirilmiştir.

$$Hata\ Payı = \frac{\left|R_{gerçek} - R_{ölçülen}\right|}{R_{gerçek}} \tag{5.1}$$

5.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi

Altlık olarak seçtiğimiz paslanmaz çeliklerden AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin kaplama öncesi , kaplama sonrası , kaplamanın ardından yapılan 550^{o}C de yapılan tavlama işlemiyle yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi amacıyla Nanoscope IV Digital Instrument Atomik Kuvvet Mikroskobu ile kontak modda 10 µm luk tarama boyutu ve 10,68 Hz lik tarama hızında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için 7x7 mm boyutlarında hassas kesicide kesilen paslanmaz çelikler temizleme işleminden sonra AFM ölçümleri alınmıştır.

5.2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu

Altlık olarak seçtiğimiz paslanmaz çeliklerden AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin kaplama öncesi , kaplama sonrası , kaplamanın ardından yapılan 550^{o}C de tavlama işlemiyle yüzey morfolojilerinin belirlenmesi amacıyla SEM ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için 22x22 mm boyutlarında hassas kesicide kesilen paslanmaz çelikler temizleme işleminden sonra sadece kaplama yapılan örneklerin iletkenliğinin sağlanması için 3 dakika vakum altında altın ile kaplanmıştır. Daha sonra Philips XL/SFE markalı SEM cihazı kullanılarak 25kV uygulanan voltaj ile 4000 ve 32000 büyütmelerde ölçümler yapılmıştır.

5.2.4 X Işını Kırınımı Analizi

Altlık olarak seçtiğimiz paslanmaz çeliklerden AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin kaplama öncesi , kaplama sonrası , kaplamanın ardından yapılan 550^{o}C tavlama işlemine tabi tutulan her bir örnek için 22x22 mm boyutlarında hassas kesicide kesilen paslanmaz çelikler temizleme işleminden sonra yapılarında bulunan kristal fazları belirlemek amacıyla Rigaku D-Max 2200 Marka XRD cihazında Cu Kα ışını ile 40kV ve 40mA de 1^{o}dakika/hız ve 0.02derece/adım aralıklarla X Işınlarına maruz bırakılmış XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5.3 Yalıtkan Malzeme Seçimi ve Seçilen Kaplama Metodu

5.3.1 Yalıtkan Malzeme Seçimi

Seçilen paslanamaz çeliklerden AISI 304 AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin üzerine düşük toksik özelliği, yüksek kimyasal stabilitesi, düşük maliyeti ve iyi bir difüzyon bariyeri olması nedeniyle ZnO yalıtkan tabaka olarak kaplanması uygun bulunmuştur.

5.3.2 Sol Jel Metodu

Her bir örnek için 22x22 mm boyutlarında hassas kesicide kesilen AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerin temizleme işleminden sonra sol jel yöntemi ile kaplanması için 50ml Etanol ve 0.22 g ZnAs 1 saat 50 ^{o}C de manyetik karıştırıcıda karıştırılarak şeffaf renkte bir çözelti hazırlanmıştır. AISI 304 örneği Spin Coater model p6700 cihazına yerleştirilmiştir ardından bir pipet yardımıyla hazırlanan çözelti 3-4 damla örneğin üzerine dökülmüş ve cihaz 3000 devirde 30 s çalıştırılarak kaplama yapılmıştır. AISI 409 ve AISI 430 örnekleri için de aynı şekilde kaplama işlemi uygulanmıştır. Daha sonra örnekler bir petri kabına yerleştirilerek 4 dk 120 ^{o}C de oksijen ortamında fırınlanmıştır. Kaplama işlemi aynı şekilde 10 kat halinde tamamlanmıştır. Kaplama yapılan örneklerin bir kısmı 550oC de 1saat oksijen ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra yukarıda belirtilen analizleri yapabilmek için tüm örnekler istenen boyutlarda hazır hale getirilmiştir.

6.DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Spektral Analiz Sonuçları

Yapılan spektral analiz sonuçlarında Tablo 6.1 de gösterildiği üzere Cr elementinin kütlece % miktarı AISI 304 %17.42, AISI 409 %16.75 ve AISI 430 için %15.95 olarak bulunmuştur. Deneysel, teorik değerler ve hata payları Tablo 6.2 de gösterilmiştir.

Örnek	C(%)	Si(%)	Cu(%)	Ti (%)	Fe(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	Al(%)
AISI 304	0.038	0.74	0.178	0.017	71.3	17.42	8.60	0.220	0.0033
AISI 409	0.027	0.492	0.123	0.54	80.4	16.75	0.270	0.75	0.0030
AISI 430	0.053	0.325	0.062	0.0056	82.8	15.95	0.131	0.054	0.0020

Tablo 6.1 AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 örneklerinin kütlece ortalama % miktarları.

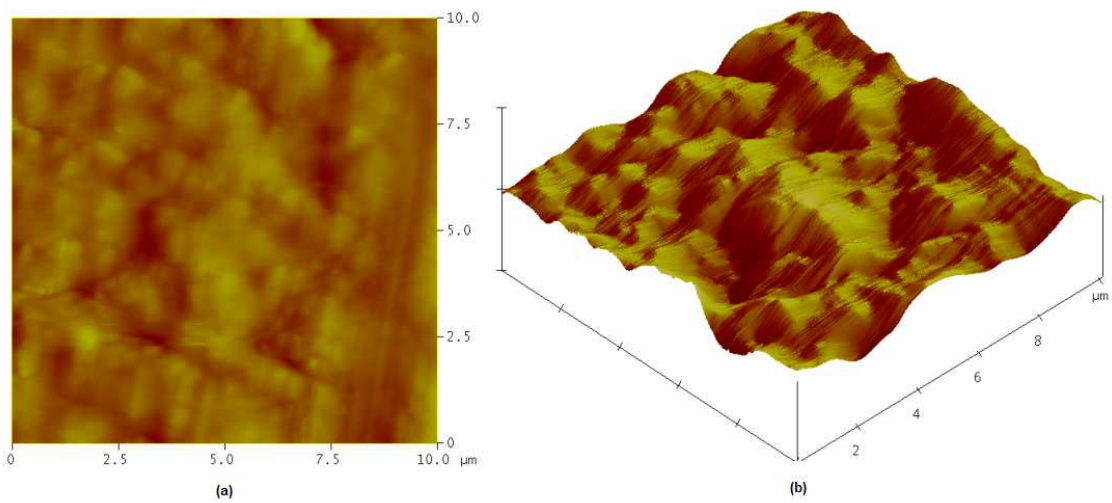
Tablo 6.2 Deneysel, Teorik Cr Miktarları ve hesaplanan hata payları

	AISI 304	**AISI 409**	**AISI 430**
Deneysel Cr Miktarı (%)	17.42	16.75	15.95
Teorik Cr Miktarı (%)	18.00	10.5-11.75	16-18
Hata Payı (%)	3	33	6

Hesaplanan hata paylarına göre paslanmaz çelik AISI 304 ve AISI 430 örneklerinin hata payları tolare edilebilir bulunurken AISI 409 örneğinin hata payı oldukça yüksek çıkmış ve kullanıma uygun bulunmamıştır.

6.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi Sonuçları

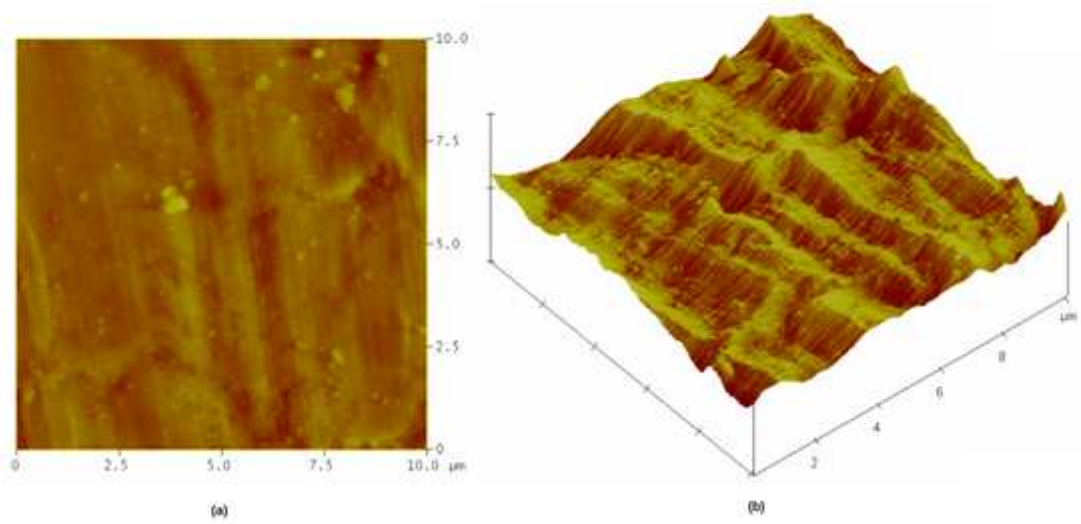
Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi için ilk önce paslanmaz çelik AISI 304 ait örneğin kaplama yapılmadan önceki 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.1 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 304 örneklerinin kaplama yapılmadan önce ortalama pürüzlülük değerleri 6,29 nm olarak ölçülmüştür. Bu değer kaplama için uygun bulunmuştur.

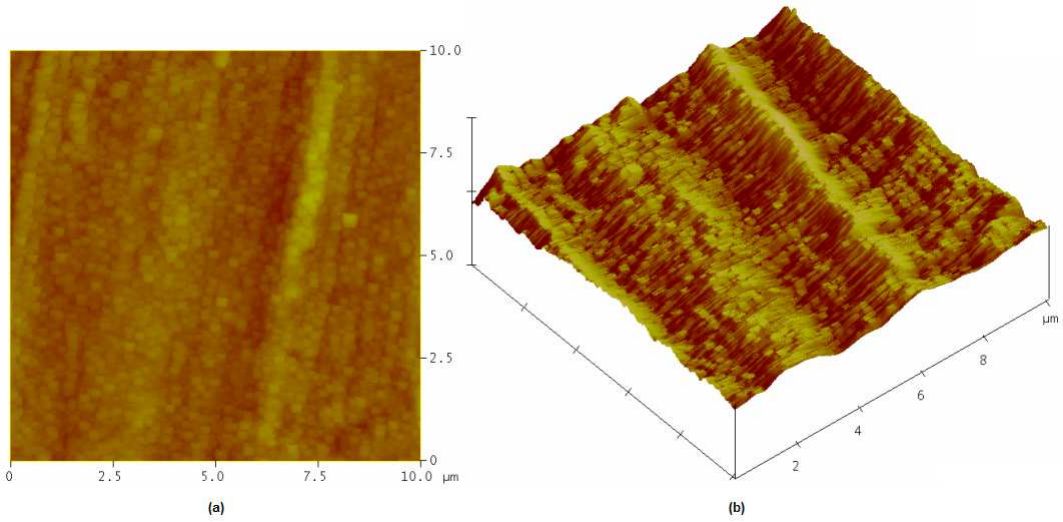
Paslanmaz çelik AISI 304 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.2 de gösterilmiştir



Şekil 6.2 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 304 örnekleri sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra ortalama pürüzlülük değerleri 8,23 nm olarak ölçülmüştür.

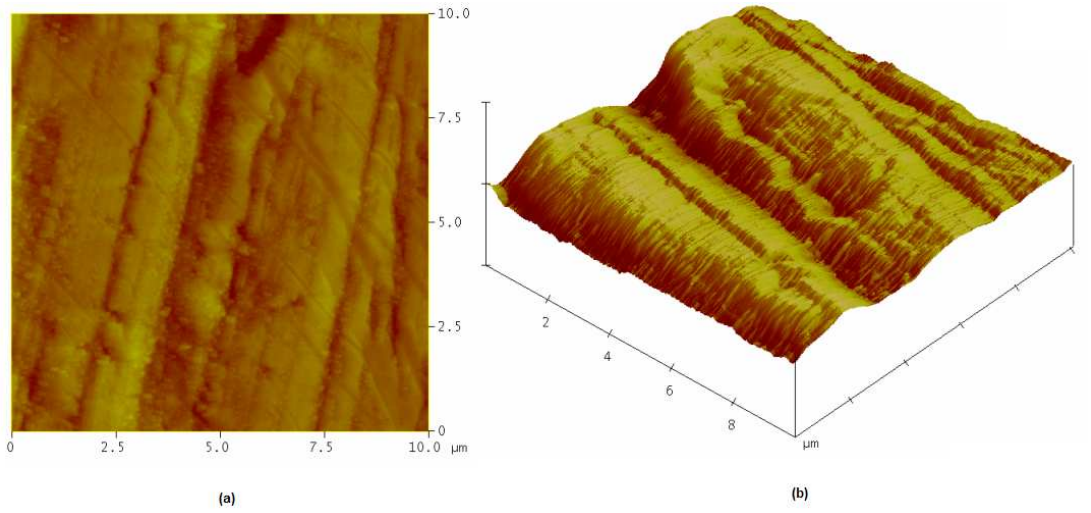
Paslanmaz çelik AISI 304 örnekler sol jel yöntemi ile kaplamanın ardından 550^{o}C de tavlama işlemine tabi tutulan örneklerin10µmx10µm alandan alınan AFM 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.3 de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 304 örneklerinin sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında tavlanması ile yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri 10.86 nm olarak ölçülmüştür. Bu örneklerin 2 boyutlu yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyde tane oluşumuna bağlı pürüzlülük gözlenmiştir. Tavlama sonucu oluşan tane büyümesi AFM 2 boyutlu görüntüsü ile 3 boyutlu topografyasında yüzey farklılığı olarak ortaya çıkmıştır.

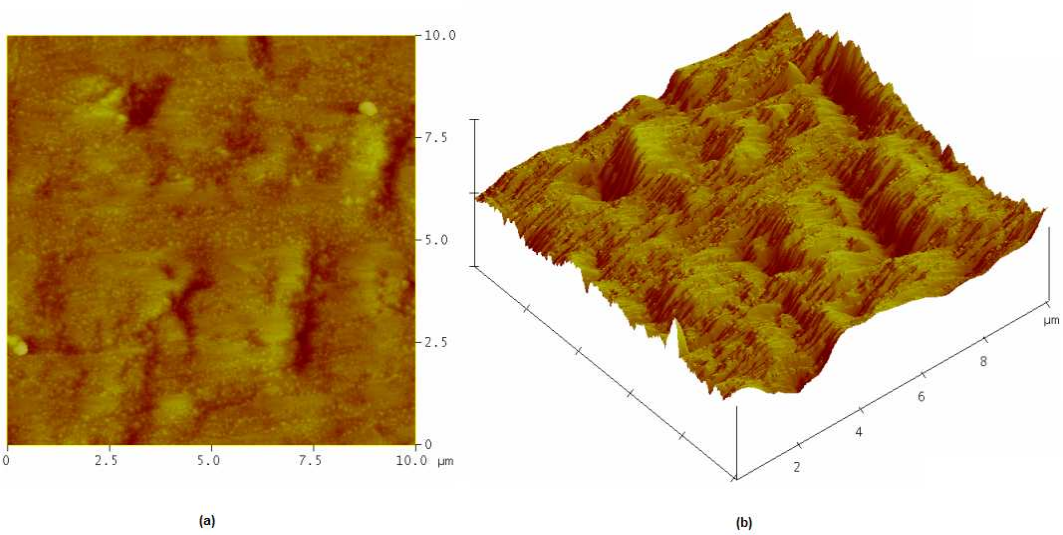
Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi için 7mmx7mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.4 de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 409 örneklerinin kaplama yapılmadan önce ortalama pürüzlülük değerleri 15,79 nm olarak ölçülmüştür. Bu değer AISI 304 örneğinde ölçülen değere göre yüksek bulunmuştur.

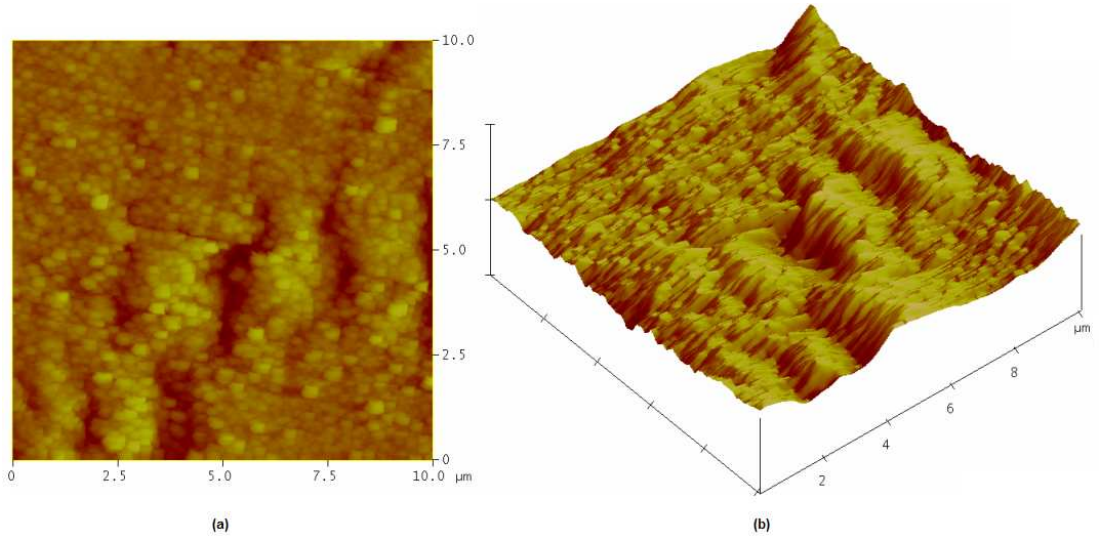
Paslanmaz çelik AISI 409 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.5 de gösterilmiştir



Şekil 6.5 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a)2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b)3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 409 örnekleri sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra ortalama pürüzlülük değerleri 16.65 nm olarak ölçülmüştür

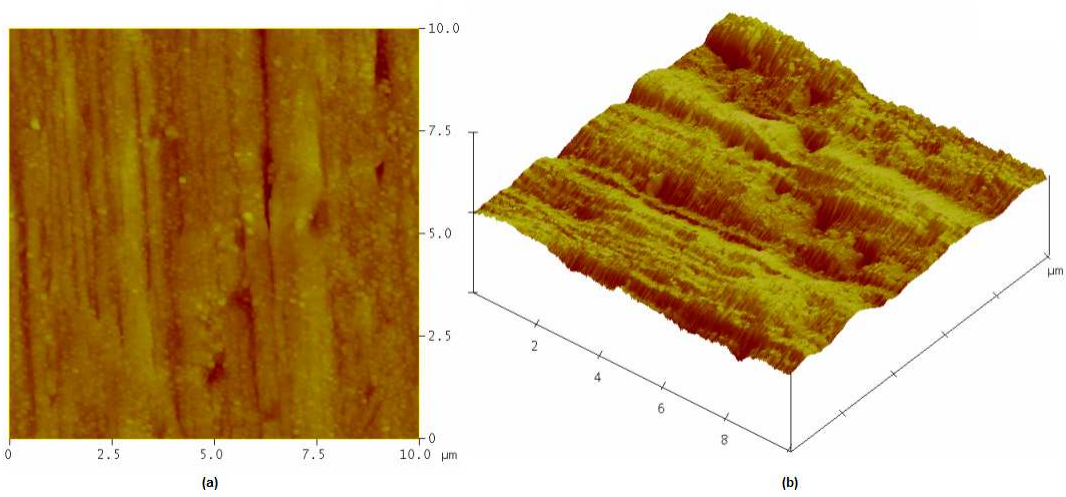
Paslanmaz çelik AISI 409 örnekler sol jel yöntemi ile kaplamanın ardından 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Örneklerin10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.6 da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 409 örneklerinin sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında tavlanması ile yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri 17.75 nm olarak ölçülmüştür. Bu örneklerin 2 boyutlu yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyde tane oluşumuna bağlı pürüzlülük gözlenmiştir. Tavlama sonucu oluşan tane büyümesi AFM 2 boyutlu görüntüsü ile 3 boyutlu topografyasında yüzey farklılığı olarak ortaya çıkmıştır.

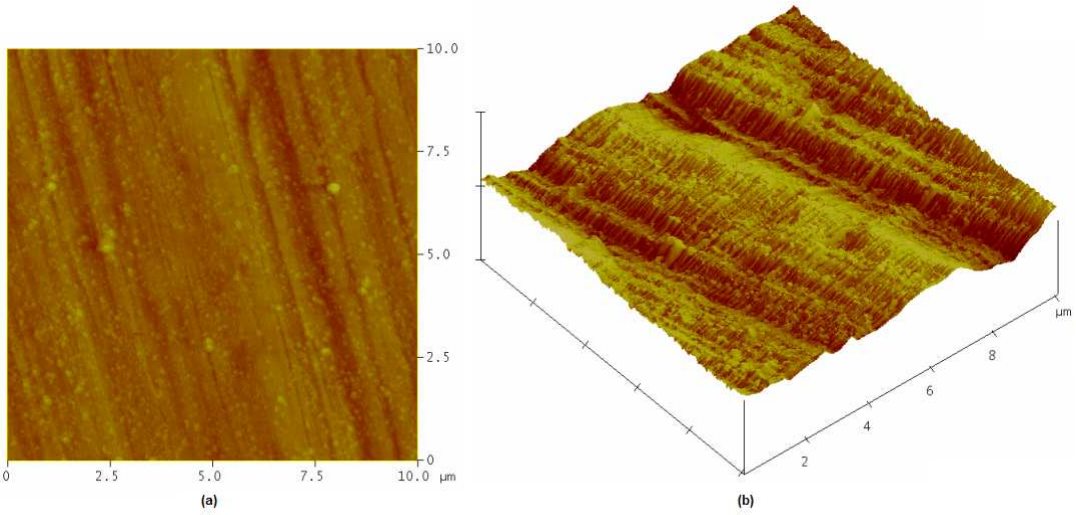
Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi için 7mmx7mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.7 de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 430 örneklerinin kaplama yapılmadan önce ortalama pürüzlülük değerleri 3,41 nm olarak ölçülmüştür.

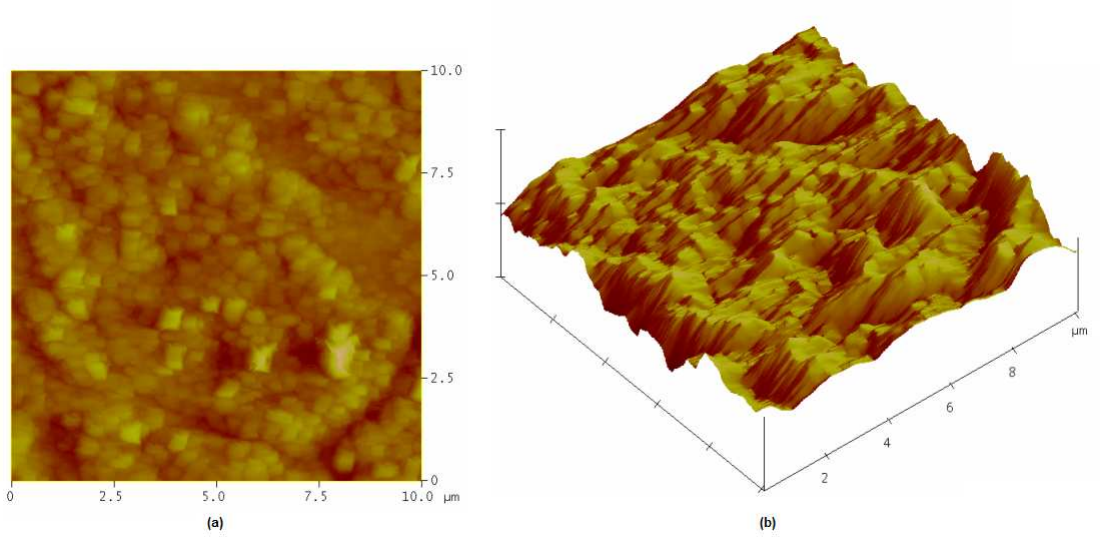
Paslanmaz çelik AISI 430 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra 10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.8 de gösterilmiştir



Şekil 6.8 . Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu Yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey Topografyası

Paslanmaz çelik AISI 430 örneklerinin sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra ortalama pürüzlülük değerleri 4,93 nm olarak ölçülmüştür.

Paslanmaz çelik AISI 430 örnekler sol jel yöntemi ile kaplamanın ardından 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Örneklerin10µmx10µm alandan alınan 2 Boyutlu yüzey görüntüsü (a) ve üç boyutlu yüzey topografyası (b) Şekil 6.9 da gösterilmiştir.

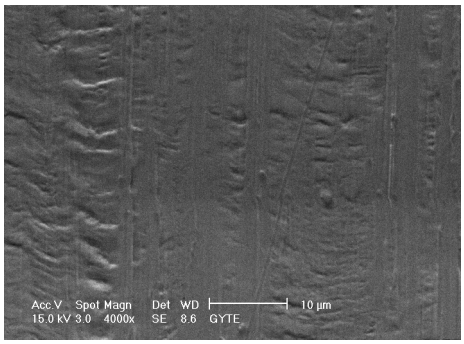


Şekil 6.9 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanmasının ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile 10 µm x 10 µm alanının AFM için (a) 2 Boyutlu yüzey Görüntüsü (b) 3 Boyutlu Yüzey topografyası

Paslanmaz çelik AISI 430 örneklerinin sol jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonra 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında tavlanması ile yüzey pürüzlülüğünün ortalama değeri 38.51 nm olarak ölçülmüştür. Bu örneklerin 2 boyutlu yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyde tane oluşumuna bağlı pürüzlülük gözlenmiştir. Tavlama sonucu oluşan tane büyümesi AFM 2 boyutlu görüntüsü ile 3 boyutlu topografyasında yüzey farklılığı olarak ortaya çıkmıştır.

6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçları

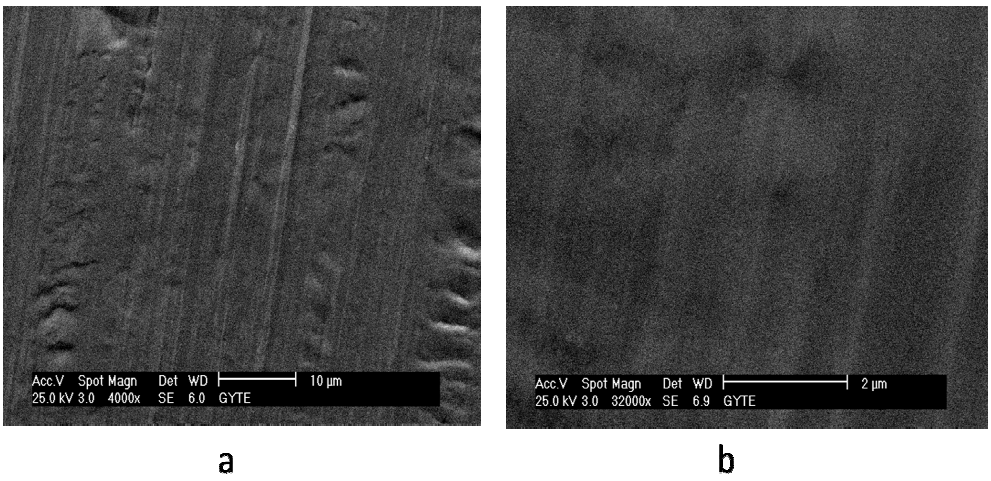
Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmedeki SEM görüntüsü Şekil 6.10 de gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü

Kaplama öncesinde paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yapılan AFM analizindeki yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu olarak yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir.

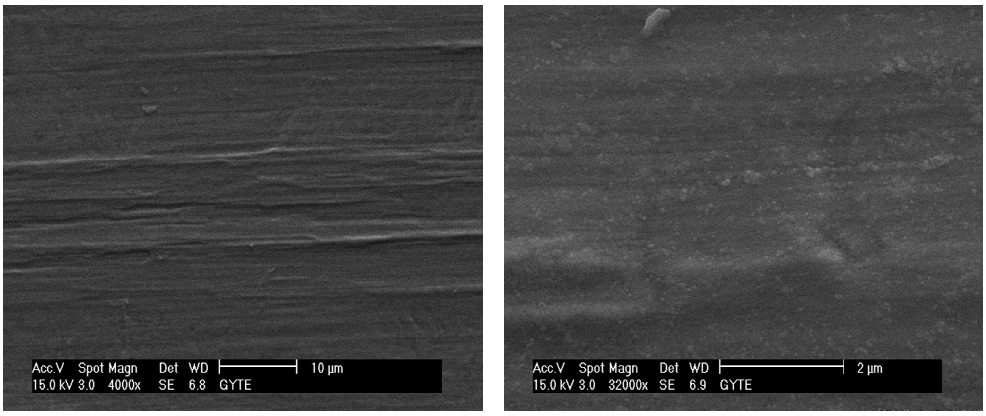
Paslanmaz çelik AISI 304 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra (a) 4000 büyütmedeki ve (b) 32000 büyütmedeki SEM görüntüleri şekil 6.11 de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama sonrasında paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin AFM yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile uyumlu olarak 4000 büyütmede incelenen SEM görüntüsüdeki yüzey morfolojisi gözlenmiştir. 32000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yüzey morfolojisinin düzgün olduğu görülmektedir.

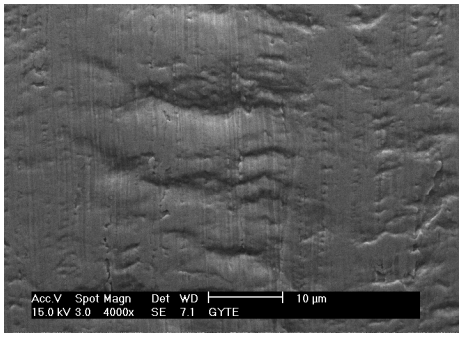
Sol jel yöntemiyle kaplanmış ve 550^{o}C de tavlanmış AISI 304 paslanmaz çelik örneğinin SEM görüntüsü sonucunda AFM yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu olduğu Şekil 6.12 de (a) 4000 büyütmedeki yüzey morfolojisi görülmektedir. Şekil 6.12 de (b) 32000 büyütmedeki SEM görüntülerinde tane büyümesine bağlı olarak yüzey morfolojisinde farklılık gözlenmiştir.



Şekil 6.12 Paslanmaz Çelik AISI 304 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama ve ardından 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında yapılan tavlama işlemi işe paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde büyük bir değişim gözlenmezken 32000 büyütmede yüzeyde taneciklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum yapılan AFM analizi ile uyum göstermektedir.

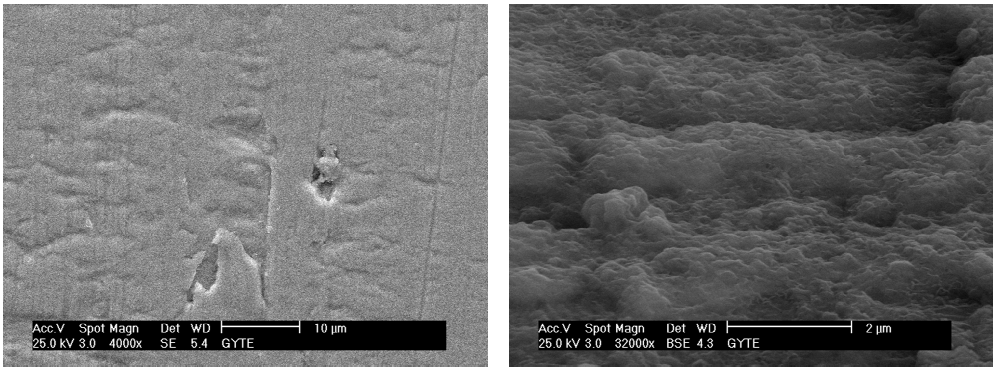
Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmedeki SEM resimleri Şekil 6.13 da gösterilmiştir



Şekil 6.13 Paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü

Kaplama öncesinde paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yapılan AFM analizindeki yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu olarak yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir.

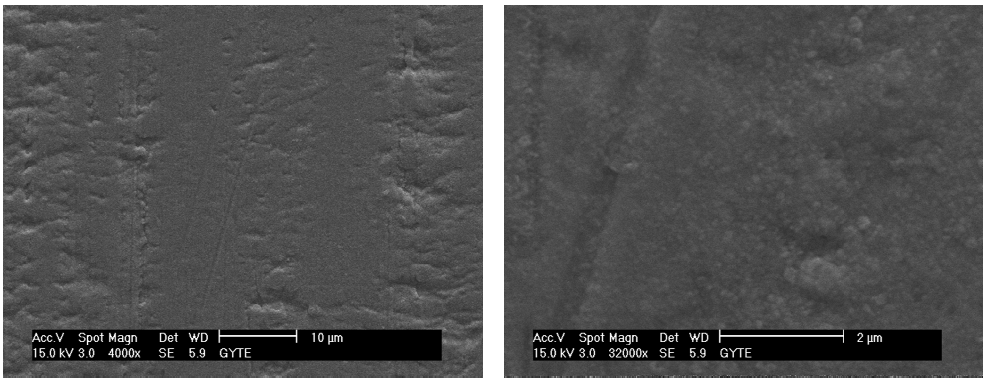
Paslanmaz çelik AISI 409 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra (a) 4000 büyütmedeki ve (b) 32000 büyütmedeki SEM resimleri şekil 6.14 de gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama sonrasında paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin AFM yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile uyumlu olarak 4000 büyütmede incelenen SEM görüntüsüdeki yüzey morfolojisi gözlenmiştir. 32000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yüzey morfolojisinin pürüzlü bir yapıda olduğu görülmektedir.

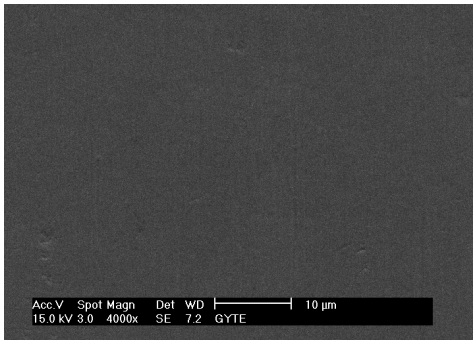
AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile (a) 4000 ve (b) 32000 büyütmedeki SEM resimleri şekil 6.15 da gösterilmiştir.



Şekil 6.15 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama ve ardından 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında yapılan tavlama işlemi işe paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde büyük bir değişim gözlenmezken 32000 büyütmede yüzeyde taneciklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum yapılan AFM analizi ile uyum göstermektedir.

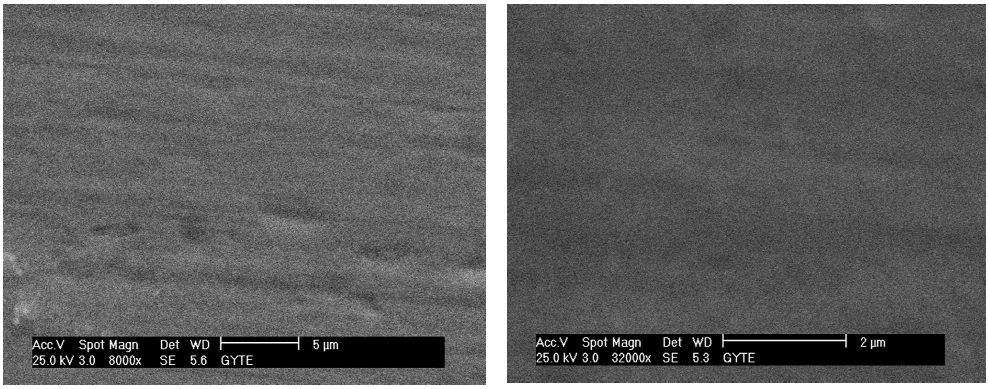
Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmedeki SEM resimleri Şekil 6.16 de gösterilmiştir



Şekil 6.16 Paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki 4000 büyütmede SEM görüntüsü

Kaplama öncesinde paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yapılan AFM analizindeki yüzey pürüzlülüğü ile uyumlu olarak yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir

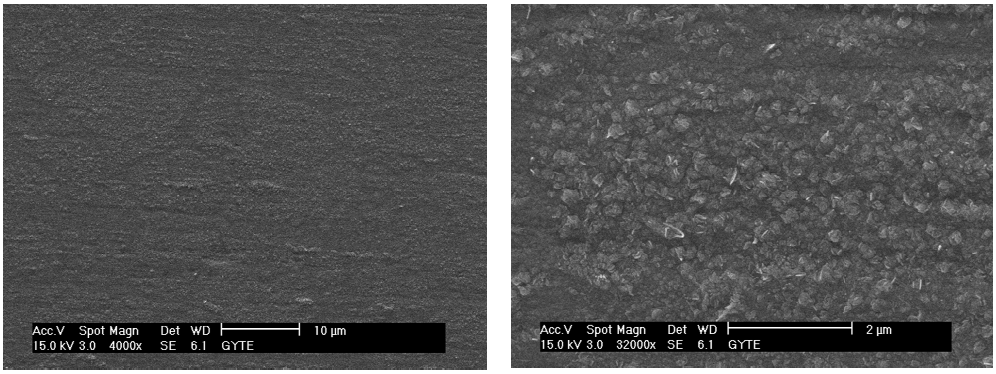
Paslanmaz çelik AISI 430 örneklerinin sol jel yöntemi ile kaplanmasından sonra (a) 8000 büyütmedeki ve (b) 32000 büyütmedeki SEM resimleri şekil 6.17 de gösterilmiştir.



Şekil 6.17 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ile (a) 8000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama sonrasında paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin AFM yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile uyumlu olarak 8000 büyütmede incelenen SEM görüntüsüdeki yüzey morfolojisi gözlenmiştir. 32000 büyütmedeki SEM görüntüsünde yüzey morfolojisinin düzgün olduğu görülmektedir

AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ardından 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile (a) 4000 ve (b) 32000 büyütmedeki SEM resimleri şekil 6.18 da gösterilmiştir.

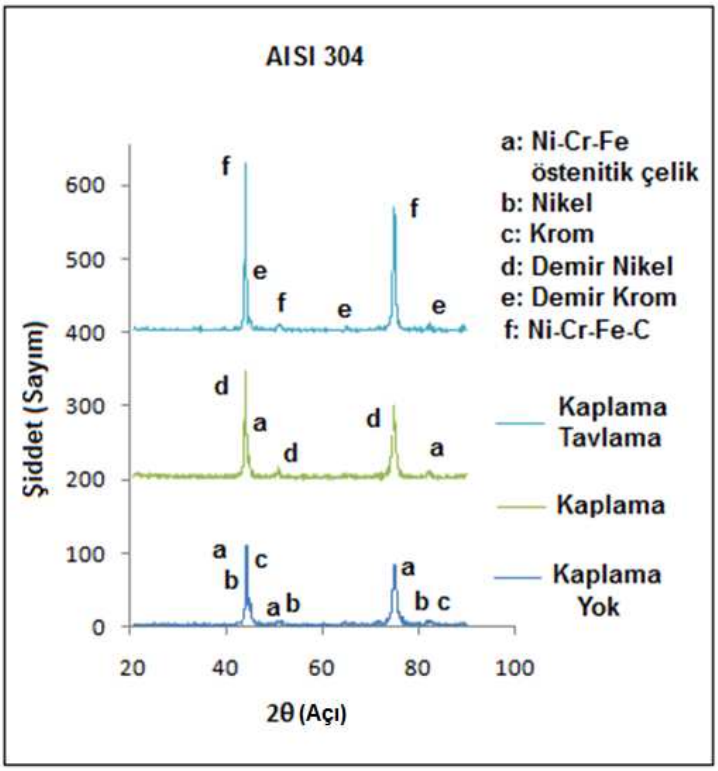


Şekil 6.18 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin sol jel metodu ile kaplanması ve 550^{o}C de 1saat oksijen ortamında tavlanaması ile (a) 4000 (b)32000 büyütmedeki SEM görüntüleri

Sol Jel yöntemi ile kaplama ve ardından 550^{o}C de 1 saat oksijen ortamında yapılan tavlama işlemi işe paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin 4000 büyütmedeki SEM görüntüsünde büyük bir değişim gözlenmezken 32000 büyütmede yüzeyde taneciklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum yapılan AFM analizi ile uyum göstermektedir.

6.4 X Işını Kırınımı Analizi Sonuçları

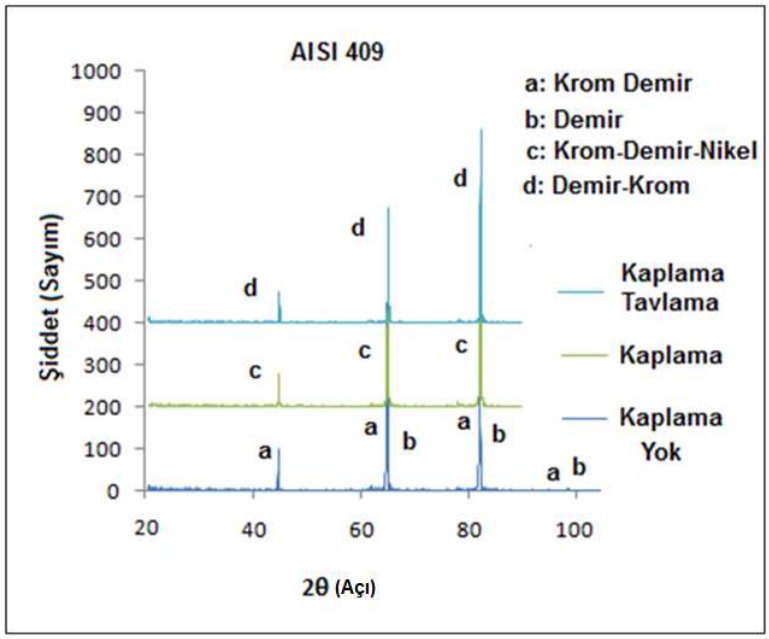
X Işını Kırınımı Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin kaplama yapılmadan önceki, Sol Jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonraki ve kaplama ve 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile oluşan X Işınını Kırınımı deseni Şekil 6.19 de gösterilmiştir.



Şekil 6.19 Paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin XRD Deseni

Paslanmaz çelik AISI 304 örneğinin kaplama XRD deseni incelendiğinde kaplama yapılmadan önce yapıda Ni-Cr-Fe, Ni ve Cr kristal fazları gözlemlenmiştir. Sol jel yöntemi ile kaplanan örneklerde mikroyapıda Fe-Ni ve Ni-Cr-Fe kristal fazları belirlenmiştir. Yapılan kaplama işlemi yapıdaki Ni ve Cr un Fe-Ni ve Ni-Cr-Fe fazlarına dönüşümüne sebebiyet vermiş bir ara faz oluşumu gözlemlenmiştir. Sol jel ile kaplanan örnekler 550^{o}C de tavlandıktan sonra alınan XRD analizi sonucunda Ni-Cr-Fe-C ve Fe-Cr kristal fazı tespit edilmiştir. Tavlama işlemi ile Fe-Ni oluşumu Ni-Fe-Cr-C fazına dönüşmüştür. Tavlama işlemi ile yapıdaki Cr ve C, Fe ve Ni ile birleşerek ayrı bir faz oluşturmuştur.

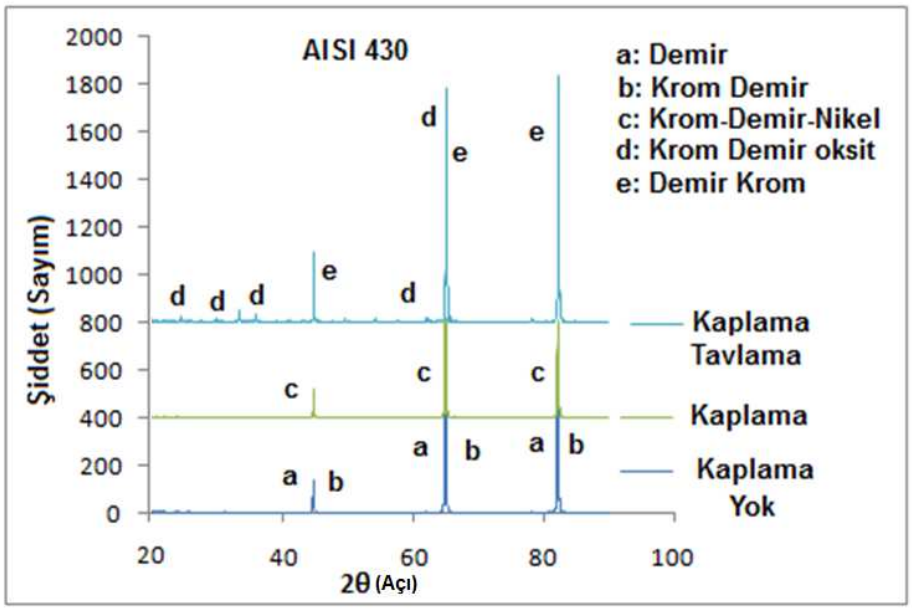
X Işını Kırınımı Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin kaplama yapılmadan önceki, sol Jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonraki ve kaplama ve 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile oluşan X Işınını Kırınımı deseni Şekil 6.20 da gösterilmiştir.



Şekil 6.20 Paslanmaz Çelik AISI 409 örneğinin XRD Deseni

Paslanmaz çelik AISI 409 örneğinin XRD deseni incelendiğinde kaplama yapılmadan önce yapıda Cr-Fe ve Fe fazları gözlemlenmiştir. Sol jel yöntemi ile kaplanan örneklerde mikroyapıda Cr-Fe-Ni kristal fazı belirlenmiştir. Kaplama işlemi Cr-Fe yapısına Ni katılımına sebebiyet vermiştir. Sol jel ile kaplanan örnekler 550^{o}C de tavlandıktan sonra alınan XRD analizi sonucunda Fe-Cr kristal fazı tespit edilmiştir. Tavlama işlemi AISI 409 örneği için Ni'in yapıdan bertaraf edilmesini sağlamıştır.

X Işını Kırınımı Analizi için 22 mm x 22mm boyutlarında hazırlanan paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin kaplama yapılmadan önceki, sol Jel metodu ile kaplama yapıldıktan sonraki ve kaplama ve 550^{o}C de 1 saat Oksijen ortamında tavlanması ile oluşan X Işınını Kırınımı deseni Şekil 6.21 de gösterilmiştir.



Şekil 6.21 Paslanmaz Çelik AISI 430 örneğinin XRD Deseni

Paslanmaz çelik AISI 430 örneğinin XRD deseni incelendiğinde kaplama öncesinde yapıda Fe ve Cr-Fe fazları gözlemlenmiştir. Sol jel yöntemi ile kaplanan örneklerde mikroyapıda Cr-Fe-Ni kristal fazı oluşumu meydana gelmiştir. Sol jel ile kaplanan örnekler 550^{o}C de tavlandıktan sonra alınan XRD analizi sonucunda Fe-Cr ve Cr-Fe-Oksit kristal fazı tespit edilmiştir. Tavlama işlemi paslanmaz çelik AISI 430 örneğinde oksit oluşumuna ve Ni'in yapıdan bertaraf edilmesine sebep olmuştur.

7. GENEL SONUÇLAR

CIGS İnce film güneş hücresi için seçilen paslanmaz çelik AISI 304, AISI 409 ve AISI 430 altlık malzemelerinin kullanılmasını değerlendirdiğimizde sırasıyla yapılan analizlere göre genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Yapılan Spektral analizler ile AISI 409 örneğinin Cr miktarının en düşük olduğu saptanırken, AISI 304 ve AISI 430 örnekleri için bu değerler AISI 409 paslanmaz çeliğe göre daha yüksek bulunmuştur.
2. Yapılan AFM Analizinde ortalama pürüzlülük değeri sırasıyla kaplama yapılmamış ve yapılmış 3.41nm ve 4.93nm olan AISI 430 örneğinin en düşük pürüzlülük değerine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. AISI 430 örneğine göre AISI 304 ve AISI 409 paslanmaz çeliklerinin pürüzlülük değerleri daha yüksektir.
3. Seçilen Altlıklardan AISI 430 örneğinin 550 C de tavlama esnasında tane büyümesi nedeniyle AFM ortalama pürüzlülük değeri 38.51nm olarak tespit edilmiştir.
4. Seçilen altlıklardan AISI 430 örneğinin 550^{o}C de tavlama esnasında tane büyümesi nedeniyle SEM görüntüsüne göre yüzey morfolojisi girintili çıkıntılı olduğu belirlenmiştir.
5. Seçilen altlıklardan AISI 430 örneğinin incelenen XRD desenine göre 550^{o}C de tavlama ile Cr-Fe-Ni kristal fazının Cr-Fe oksit'e dönüşümü gözlemlenmiş olup Nikel'in yapıdan uzaklaştırılmıştır.

Bu değerlere göre CIGS İnce film güneş hücresi altlığında kullanılan paslanmaz çelik örneklerinin kütlece maksimum %16-25 Cr oranında ve maksimum yüzey pürüzlülüğü 200nm olarak literatürde belirlenmiş değerlerdir. Buna göre kullanılan AISI 304, AISI 409, AISI 430 paslanmaz çelikleri uygundur. Bu değerlendirmeye göre en uygunu AISI 430 olduğu bu deneysel çalışmada belirlenmiştir. Kaplama için de bu altlık düşünülebilir. Diğer kaplama yöntemleri ile farklı yalıtkan tabakalar denenebilir. EDX ve XPS analiz metotları da diğer çalışmalarda yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

1. Agency of Natural Resources and Energy, July 15 (1998), MITI, Energy Flow Diagram of Japan in 1997, Energy Strategy of 21st Century
2. Birkmire R.W., 2001, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 65, 17
3. Bhattacharya, R.N., Ramanathan, K., 2004. Cu(In,Ga)Se_2 Thin Film Solar Cells with Buffer layer alternative to CdS. Solar Energy 77, pp 679-683
4. Bhattacharya, W. Batchelor, H. Wiesner, F. Hasoon, J.E. Granata, K. Ramanathan, J. Alleman, J. Keane, A. Mason, R.J. Matson, R.N. Noufi, J. Electrochem. Soc. 145Z1998.3435
5. Britt, J., Ferekides C. 1993: Appl. Phys. Lett. 62:2851
6. Boden, D. Br¨aunig, J. Klaer, F. H. Karg, B. Hosselbarth, and G. La Roche,2000, Conf. Rec. 28th IEEE Photovolt. Spec. Conf., IEEE, Piscataway, N.J., 1038
7. Chaisitsak, S., Yamada, A., Konagai, M., 2001. In: The Proceedings of the materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, p.668
8. Contreras, B. Egaas, K. Ramanathan, J. Hiltner, A. Swartzlander, F. Hasoon, R. Noufi, Prog. Photovoltaics 7Z1999. 311
9. Cusano, D. 1963: Solid State Electron 6:127
10. Donglin , Li Jangzhuang, Xu Man, Zhao Xiujian,2008, Electrodeposited and selenized CIGS thin films for solar cells,Elsevier, Journal of Non-Crystalline Solids 354 pp 1447-1450
11. Fahrenbruch, A.L. Bube, R.L 1983. Fundamentals of Solar Cells, Academic Press, New York, p.489
12. Fernandez, P.J. Sebastian, R.N. Bhattacharya, R. Noufi, M. Contreras, A.M. Hermann, Semicond. Sci. Technol. 12 Z1996.994
13. Green, M.A., Zhao, J., Wang, A., Wenhan, S.R., 2001. Progress and Outlook for high efficiency crystalline silicon solar Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 65, 9-16
14. Guillemoles, L. Kronik, D. Cahen, U. Rau, A. Jasenek, and H.-W. Schock, J., 2000, Phys. Chem. B(104), 4849
15. Hamakawa, Y., Thin Film Solar Cells, Springer pp18-19-27-30
16. Hamakawa,Y. ,2000, Oyobutsuri 69:8, pp. 993-998 and 1998 ibid 67:9, pp.1023-1028

17. Herz K., A. Eicke,F. Kessler, R. Wachter, M. Powalla, 2003, Diffusion Barriers for CIGS Solar Cells On Metallic Substrates, Elsevier pp 392-397
18. International Centre for Diffraction Data, Powder Diffraction Files, Card 40–1487 Newtown Square, Pennsylvania, PA
19. Ito,K., 2000, Prospect of Fossil Fuels in the book of "Energy for 21st Century", 3rd annual Meeting Report for Nuclear Fusion.
20. Jasenek A. and U. Rau, 2001, J. Appl. Phys. 90, 650
21. Jasenek A., Rau U., K. Weinert, I. M. K¨otschau, G. Hanna, G. Voorwinden, M. Powalla, H. W. Schock, and J. H. Werner, 2001, Thin Solid Films 387, 228
22. Kawakita, M. Imaizumi, M. Yamaguchi, K. Kushiya, T. Ohshima, H. Itoh, and S. Matsuda, 2002, Jpn. J. Appl. Phys., Part 241, L797
23. Kazmerski, L.L., White, F.R., Morgan, G.K., 1976. Thin Film $CuInSe_2$/CdS heterojunction solar Cells. Applied Physics Letters 29, 268-270
24. Kemell M., Ritala M., and Leskela M., 2005, Thin Film Deposition Methods for CuInSe2 Solar Cells, Taylor&Francis Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences pp 1-31
25. Kessler F., Herrmann D., Powalla M., 2004, Approaches to flexible CIGS thin film solar cells,pp 491-498
26. Kessler F., Rudmann D., 2004, Technological Aspects of Flexible CIGS Solar Cells and Modules, Elsevier 685-695
27. Kojima T., Koyanagi T.,, K. Nakamura, T. Yanagisawa, K. Takahisa, M. Nishitani, and T. Wada, 1998, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 50, 87
28. Konolov I., 2004, Material Requirements for CIS solar cells pp 413-419
29. LONG Fei1,2, Weiming WANG1, Jingjing DU1, Zhengguang ZOU2, 2009, CIS(CIGS) thin films prepared for solar cells by one-step electrodeposition in alcohol solution,Jornal of Physics:Conference Series 152
30. Merino J.M., J.L. Martin de Vidales, S. Mahanty, R. Diaz, F. Rueda, and M. Leon, 1996 J. Appl. Physics. 80,5610
31. Neville, R., 1995 Solar Energy Conversion The Solar Cell, The Netherlands, Elsevier, Second Edition, pp.85-125

32. Niki S., Contreras M., Repins I., Powalla M.,Kushiya K., Ishizuka S., and Matsubara K.,2010, CIGS absorbers and processes, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2010; 18:453–466

33. Ohtake, Y., Kushiya,K., Ichikawa, M., Yamada, A., Konagai, M., 1995 Polycristalline Cu(InGa)Se_2 Thin Film Solar Cells With ZnSe buffer layers. Japanese Journal of Applied Physics 34, pp5949-5955

34. Okeyama, H., Aramato, T., Kumazawa, S., Higuchi, H., Arita, T.Shibutani, S., Nishio, T., Nakajima, J., Tsuji, M., Hanafusa, A., Hibino, T., Omura, K. 1997: Proc. 26th IEEE PVSC, p343

35. Pern, R. Noufi, A. Mason, A. Franz, Thin Solid Films 202 (1991) 299

36. Ramanathan, K., Contreras, M.A., Perkins, C.L., Asher, S., Hasoon, F., Keane, J., Young, D., Romero, M., Metzger, W., Noufi, R., Ward, J., Duda, A., 2003. Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe_2 thin film solar Cells. Progress in Photovoltatics: Research and Applications 11, 225-230

37. Razykov T.M., C.S. Ferekides, D. Morel, E.Stefanakos, H.S. Ullal, H.M.Upadhyaya, 2011, Solar Photovoltatic Electricity:Current status and future prospects, pp 1-29

38. Schuisky M., Jan 25 2011, Steel Strip Coated With Zirconia, Patent No:US7,875,360 B2

39. Shi C. Y.,YunSun, QingHe, F.Y.Li, J.C.Zhao,2009, Cu(In,Ga)Se2 solar cellsonstainless-steelsubstratescoveredwithZnO diffusion barriers, ElsevierSolar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) pp 654–656

40. Schock H.W., and R. Noufi, 2000, Prog. Photovolt.: Res. Appl. 8, 151

41. Shivagan , P.J. Dale, A.P. Samantilleke, L.M. Peter,2007, Electrodeposition of chalcopyrite films from ionic liquid electrolytes, Elsevier, Thin Solid Films 515 pp 5899-5903

42. Spiering, S., Hariskos, D., Powalla, M., Naghavi, N., Lincot, D., 2003. CD free Cu(In,Ga)Se_2 Thin Films solar modules with In_2S_3 Buffer Layer by ALCVD. Thin Solid Films pp431-432, 359-363

43. Tringe, J. Nocerino, R. Tallon, W. Kemp, W. Shafarman, and D. Marvin, 2002, J. Appl. Phys. 91, 516

44. Ugartea, R. Schreblerb, R. CoÂrdovab, E.A. Dalchielec, H. GoÂmezb, 1998, Electrodeposition of CuInSe2 thin Films in a glycine acid medium,Elsevier, Thin Solid Films 340 pp 117-124
45. Wagner, S., Shay, J., Migliorato, P., Kasper, H., 1974 $CuInSe_2$/CdS heterojunction photovoltatic detectors. Applied Physics Letters 25, 434
46. Wang, Z.A., Zhu, H.B., Zhang, D.W., Shi, J.H., Li, X.D., Cheng, W.J., Sun, Z., Huang, S.M., 2009. Stability of transparent conducting oxide films deposited by sputtering for solar cells applications. In: Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Art. No. 5411587, pp. 000676–000679
47. Wei, S. B. Zhang, and A. Zunger, 1998, Appl. Phys. Lett. 72, 3199
48. Yamaguchi M.,1995, J. Appl. Phys. 78, 1476
49. Yang, J. , Banerjee, A., Guha, S.1997: Appl Phys.Letter. 70:2975
50. Yang,J., Banerjee,A., Glatfelter,T., Sugiyama, S.Guha, S. 1997 : Proc. 26th IEEE PVSC., p.563
51. Zabierowski, U. Rau, and M. Igalson, 2001, Thin Solid Films 387, 147
52. Zhang, S.-H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, 1998, Phys. Rev. B 57, 9642
53. http://www.habitaticingenclik.org.tr/dl/yayinlar/enerji/G_Pilleri.pdf
54. http://www.efunda.com/materials/alloys/stainlesssteels/showstainless.cfm?ID=AISI_Type_409&show_prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20304
55. http://www.efunda.com/materials/alloys/stainlesssteels/showstainless.cfm?ID=AISI_Type_409&show_prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20409
56. http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_430&prop=all&Page_Title= AISI%20Type%20430

ÖZGEÇMİŞ

Kübra Erdoğar 1984 yılında Eskişehir'de doğmuştur. İlköğretim ve lise öğrenimini İstanbulda tamamladıktan sonra 2003 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik bölümünü kazanmıştır. 2007 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2009 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde Malzeme Bilimi ve Müh. Bölümünde yüksek lisans eğitimine bağlamış ve 2011 yılında mezun olmuştur**.**