

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOĞUK ALTLIK YÖNTEMİYLE Ag/n-Si METAL-YARIİLETKEN
İKİLİ YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

GİZEM ÖZTÜRK

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. VAGİF NEVRUZOĞLU
TEZ JÜRİLERİ
PROF. DR. MURAT TOMAKİN
DOÇ. DR. İSMAİL POLAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RİZE 2019

Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SOĞUK ALTLIK YÖNTEMİYLE Ag/n-Si METAL-YARIİLETKEN İKİLİ
YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında, Gizem ÖZTÜRK tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/07/2019 tarihinde Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı Adı Soyadı
Başkan	: Prof. Dr. Murat TOMAKIN
Üye	: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU
Üye	: Doç. Dr. İsmail POLAT

İmzası

M. Tomakin
V. Nevruzoglu
I. Polat


Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Akademik kariyerimin önemli noktalarından biri olan yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca her zaman bana destek olup yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana yol gösteren, yaptığım çalışmanın temellerini atmamda büyük paya sahip olan ve her konuda bana yardım eden hocam Sayın Prof. Dr. Murat TOMAKİN'e ve yüksek lisans tez çalışmamda ve proje kapsamında desteklerini esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Zeynep YEŞİL DUYMUŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere ulaşmamda en büyük paya sahip olan, emeklerinin karşılığını asla ödeyemeyeceğim, yanımda olmadıkları zamanlarda bile desteklerini her zaman hissettiğim anneme, babama, kardeşlerime ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Enerji Mühendisliği'ne ve çatısı altında görev yapan tüm hocalarıma, sevdiklerime ve dostlarıma da teşekkür ederim.

Hazırlanan bu Yüksek lisans tezi TÜBİTAK tarafından 315M132 nolu proje ile desteklenmiştir.

Gizem ÖZTÜRK

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Soğuk Altık Yöntemiyle Ag/n-Si Metal-Yarıiletken İkili Yapıların Üretilmesi ve Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 05/07/2019


Gizem ÖZTÜRK

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

SOĞUK ALTLIK YÖNTEMİYLE Ag/n-Si METAL-YARIİLETKEN İKİLİ YAPILARIN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gizem ÖZTÜRK

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

Bu tez çalışmasında en önemli husus, daha önceden denenmeyen yeni bir teknolojik sürecin Ag/n-Si ikili yapılarının oluşumunda kullanılmasıdır. Soğuk altlık tekniği olarak adlandırılan bu yeni uygulamada, altlık yüzeyi eşit boyutlu kümelerle kaplanmaktadır. Bu büyüme mekanizmasına soliton büyüme mekanizması adı verilir. Bilindiği üzere nano boyutlu gümüş taneleri UV ışınları ile ışınlandırıldığında yüzeysel plazmon rezonans olayı gerçekleşmektedir. Gümüş tanelerinin bu özellikleri kullanılarak ilk defa ısısal tahribata uğratmadan n-Si tabanlı polikristal yapı yüzeyine 200 K ve 300 K sıcaklıklarında kısmen kapalı ortamda soğuk altlık yöntemi ile gümüş buharlaştırılarak Ag/n-Si ikili yapılar (Schottky diyot) oluşturuldu. Metal-yarıiletken geçidinin oluşumu için bu ikili yapılar foto-uyarmalı difüzyon sürecine tabi tutuldu. Elde edilen örneklerin XRD, SEM, EDS ve FESEM ölçümleri alınarak yapısal özellikleri incelendi. I-V ölçümlerinden idealite faktörü (n) ve sıfır besleme engel yüksekliği (Φ_B) gibi elektriksel parametreler hesaplandı. Ayrıca Cheung yöntemi kullanılarak seri direnç (R_s) ve idealite faktörü (n) hesaplandı. 200 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotlarda elde edilen karakteristik özelliklerin 300 K'e kıyasla daha verimli olduğu gözlemlendi. Bunun nedeni 200 K altlık sıcaklığında silisyum yüzeyindeki gümüş tabakasının eşit boyutlu kümelerden oluşmasından ve bu tabakaların UV ışını ile ışınlanarak foto-uyarmalı difüzyon sürecine tabi tutulmasından kaynaklanmaktadır.

2019, 72 sayfa

Anahtar Kelimeler: Soğuk Altlık Tekniği, Soliton Büyüme Mekanizması, Schottky Bariyeri

ABSTRACT

PREPARATION OF Ag/n-Si METAL-SEMICONDUCTOR BI-STRUCTURES VIA LOW-TEMPERATURE DEPOSITION METHOD AND INVESTIGATION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES

Gizem ÖZTÜRK

Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering
Master Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

The most important point of this thesis is use of a new technologic process that have never been applied before, in formation of Ag/n-Si bi-structure. In this new application which is low temperature deposition method, substrate surface is coated with equal size grains. This growth mechanism is named soliton mechanism. As known, when equal sized silver grains are irradiated with UV lights, surface plasma resonance phenomenon occurs. By using this characteristic of silver grains and evaporation of silver over n-Si based polycrystalline structure surface via low temperature deposition method at 200 K and 300 K temperatures and in almost close environment, Ag/n-Si bi-structures (Schottky diode) have been formed for the first time without any thermal damage. These bi-structures have been exposed to photo-excited diffusion process for metal semiconductor gate formation. Structural characteristics of acquired samples have been examined via XRD, SEM, EDS and FESEM measurements. Electrical parameters such as ideality factor (n) and zero bias barrier height (Φ_b) have been calculated from I-V measurements. Also serial resistor (R_s) and ideality factor (n) have been calculated by using Cheung method. It is observed that characteristics of produced Schottky diodes at 200 K substrate temperature are more efficient than 300 K temperature because silver layer on silicon surface is formed as equal sized grains at 200 K substrate temperature and when these layers are irradiated with UV lights, plasma resonance phenomenon occurs on surface of diode.

2019,72 pages

Keywords: Low Temperature Deposition Method, Soliton Mechanism, Schottky Barrier

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti.....	2
1.3. Kuramsal Temeller	6
1.3.1. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgiler.....	6
1.3.2. Silisyumun Yapısal Özellikleri.....	8
1.3.3. Gümüş Elementinin Yapısal Özellikleri	12
1.3.4. Metal – Yarıiletken Kontaklar	13
1.3.4.1. n-Tipi Yarıiletken-Metal Doğrultucu (Schottky) Kontaklar.....	14
1.3.4.2. n-Tipi Yarıiletken-Metal Omik Kontaklar.....	17
1.3.5. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	19
1.3.5.1. Termoyonik Emisyon Teorisi (TE)	20
1.3.5.2. Difüzyon Teorisi	22
1.3.6. İnce Film Elde Etme Yöntemleri	23
1.3.7. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yöntemi	23
1.3.7.1. Rezistans ile Buharlaştırma	25
1.3.7.2. Endüktif ile Buharlaştırma.....	26

1.3.7.3. İyon Demeti ile Sıçratma Tekniği.....	27
1.4. İnce Film Oluşumu ve Büyüme	28
1.5. İnce Filmlerde Yapısal Bölge Modeli ve Foto-uyarmalı Süreç.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	39
2.1. Altlıkların Hazırlanması	39
2.2. Soğuk Altlık Yöntemi.....	39
2.3. Ag/n-Si Örneklerinin Hazırlanması	43
2.4. Hazırlanan Örneklerin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	45
2.4.1. X-Işını Kırınım Cihazı (XRD) Ölçümleri.....	45
2.4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri.....	46
2.4.3. UV Cihazı	48
2.4.4. Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi	49
3. BULGULAR.....	50
3.1. Ag Kaplanan n-Si Örneklerin XRD Analiz Sonuçları.....	50
3.2. Ag Kaplanan n-Si Örneklerin SEM Analiz Sonuçları	52
3.3. Elde Edilen Örneklerin EDS Analizi Sonuçları.....	56
3.4. Akım-Gerilim Ölçümleri	58
3.5. Schottky Diyotlarda Seri Direnç.....	62
4. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	64
5. ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Değerlik bandının üzerine ve iletim bandının tabanına yakın elektronlar için dağılım bağıntıları.....	7
Şekil 2. Değerlik bandı üzerindeki boşluklar için dağılım bağıntısı	8
Şekil 3. Silisyumun bağ yapısı	9
Şekil 4. Silisyumda atomlar arası bağların gösterimi a) $T=0$, b) $T > 0$	10
Şekil 5. Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü. 11	
Şekil 6. a) Donör, b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları.....	11
Şekil 7. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağın; a) kontakta önce enerji-band diyagramı, b) kontak oluşuktan sonra enerji-bant diyagramı.	15
Şekil 8. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakta önceki b) Kontakta sonraki durumları	17
Şekil 9. Ters ve düz beslem durumlarında omik kontağın enerji-bant diyagramları:	18
a) $V < 0$ durumu b) $V > 0$ durumu.....	18
Şekil 10. Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi	19
Şekil 11. İnce film üretim teknikleri şeması.....	23
Şekil 12. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi şeması	24
Şekil 13. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 14. Rezistans ile buharlaştırma yöntemi.....	26
Şekil 15. Endüktif ile buharlaştırma tekniği	26
Şekil 16. İyon demeti ile sıçratma	27
Şekil 17. Gelen atomun altlıkla etkileşmesi	29
Şekil 18. Kaplama sırasında filmin büyümesi	31
Şekil 19. İnce film gelişim modelleri: a) Frank Van Der Merwe b) Stranski –	32
Krastanov c) Volmer Weber	32
Şekil 20. Yapısal bölge modeli.....	33
Şekil 21. Işınlendirme sonucu atomların yüklerinin değişimi ile potansiyel kuyunun görüntüsü.....	36
Şekil 22. Üretimi yapılan Ag/n-Si örnekleri.....	39
Şekil 23. Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	40

Şekil 24. a) Soğuk altlık üzerinde ince film hazırlamak için kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi. b) Tez kapsamında kullanılan vakum sistemi ve soğuk altlık aparatının şematik gösterimi.	42
Şekil 25. VAKSİS PVD handy/1DLE-LN marka termal buharlaştırma sistemi.....	43
Şekil 26. Örneklere gümüş pasta sürülmesi.....	44
Şekil 27. Oluşturulan Schottky diyotun şematik görünümü.....	44
Şekil 28. Oluşturulan omik kontakın I – V grafiği.....	45
Şekil 29. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi	46
Şekil 30. SEM cihazı ve şematik gösterimi.....	47
Şekil 31. JEOL marka JSM-6610 model taramalı elektron mikroskobu.....	48
Şekil 32. CAMAG marka ultraviyole cihazı	49
Şekil 33. 200 K ve 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Ag/n-Si örneklerin XRD ölçüm sonuçları; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K.....	51
Şekil 34. Ag/n-Si Schottky diyotların örgü parametreleri.....	52
Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda üretilen Ag/n-Si ikili yapıların SEM görüntüleri; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K	53
Şekil 36. 300 K ve 200 K altlık sıcaklığında cam üzerinde hazırlanan örneklerin 5s-20s aralığındaki FESEM görüntüleri: a) 300 K - 5 s., b) 200 K - 5s., c) 300 K - 10 s., d) 200 K - 10 s., e) 300 K - 15 s., f) 200 K - 15 s., g) 300 K – 20 s., h) 200 K – 20 s.	55
Şekil 37. Farklı altlık sıcaklığında hazırlanan Ag/n-Si yapısının EDS analizi; a) 300 k, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K.....	57
Şekil 38. Farklı sıcaklıklarda hazırlanan Ag/n-Si Schottky diyotların I-V karakteristikleri; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K	58
Şekil 39. Farklı altlık sıcaklığında hazırlanan diyotların (I)-V grafiği; a)300 K, b) 200 K, c) 100 K.....	60
Şekil 40. Schottky diyotların $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri; a)300 K, b)200 K, c)100 K	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri	12
Tablo 2. Gümüş elementinin bazı özellikleri	13
Tablo 3. Ag/n-Si Diyotların I-V grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri .	61
Tablo 4. Ag/n-Si diyotların Cheung fonksiyonlarıyla elde edilen parametreleri.....	63



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A^*	Richardson Sabiti
a_t	Konaklama Katsayısı
Å	Amstrong
Ag	Gümüş
cm	Santimetre
cm^2	Santimetrekaire
cm^3	Santimetreküp
D	Kristal Boyutu
D_n	Elektron Difüzyon Sabiti
eV	Elektron Volt
E_A	Altlığın enerjisi
E_{\uparrow}	Altlık Yüzeyinden Yansıyan Atomların Enerjisi
E_{\downarrow}	Altlık Yüzeyine Gelen Atomların Enerjisi
E_C	İletkenlik Bandı Enerjisi
E_V	Valans Bandı Enerjisi
E_g	Yasak Enerji Bant Aralığı
FE	Alan Emisyonu
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscope
F(V)	Norde Fonksiyonu
f(E)	Fermi-Dirac İhtimaliyet Fonksiyonu
f	Altlık Küme Arasındaki Etkileşme Kuvveti

$g_c(E)$	İletkenlik Bandı Durum Yoğunluğu Fonksiyonu
Ge	Germanyum
h, k, l	Miller İndisleri
h	Planck Sabiti
I_o	Doyma Akımı
J_{SD}	Doyma Akımı Yoğunluğu
J_s	Toplam Akım Yoğunluğu
K	Termodinamik Sıcaklık (Kelvin)
m_n^*	Boşluk Etkin Kütlesi
m_e^*	Elektronun Etkin Kütlesi
MIS	Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MS	Metal/Yarıiletken
n	İdealite Faktörü
$n(x)$	Elektron Yoğunluğu
nm	Nanometre
P	Fosfor
PVD	Physical Vapor Deposition
R_s	Seri Direnç
SEM	Scanning Electron Microscope
Si	Silisyum
SD	Schottky Diyotlar
T	Mutlak Sıcaklık
T_s	Altık Sıcaklığı
T_m	Buharlaştırılan Malzemenin Erime Sıcaklığı

TFE	Termiyonik Alan Emisyonu
TE	Termiyonik emisyon
UV	Ultra Violet
XRD	X-Ray Diffraction
°	Derece
°C	Santigrat Derece (Celsius)
σ_n	Elektronların İletkenliği
σ_p	Boşlukların iletkenliği
ϵ_0	Boşluğun Dielektrik Sabiti
ϵ_i	Oksit Tabakasının Dielektrik Sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
Φ_s	Yarıiletkenin İş Fonksiyonu
Φ_m	Metalin İş Fonksiyonu
ϕ_B	n-Tipi Yarıiletken İçin Potansiyel Engel Yüksekliği
χ_s	Yarıiletkenin Elektron İlgisi
ψ_s	Yarıiletkenin Yüzey Potansiyeli
μ_e	Elektron Mobilitesi
θ	Bragg Açısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde yarıiletken malzemelerin kullanımı ile ilgili büyük bir sanayi oluşmuş ve elektronikte yarıiletken teknolojisi gelişmiştir. Yarıiletken olarak silisyum (Si) ve germanyum (Ge) önemli ölçüde kullanılmış ancak doğada bol miktarda bulunması nedeniyle yarıiletken teknolojisinde silisyum kullanımı daha yaygın hale gelmiştir.

Enerji üretim alanında metal ve yarıiletkenlerin, karakteristik özelliklerinden faydalanılarak elde edilen elektronik devre elemanlarının farklı kullanım alanları vardır. Bu yapılar örneğin güneş pilleri, metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET), Schottky diyotlar (SD), tristörler ve varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler) olarak kullanılmaktadır.

Burada elektriksel karakteristiklerinin çoklukla bilinmesi ve yapılarının kolaylığından dolayı Schottky diyotlar, yarıiletken tabanlı elektronik teknolojisinin önemli ögeleri olmuşlardır. Kontak özelliklerinin yeniden yapılandırılabilmesi ve bu özelliklerin kararlılığı, yüksek kalitede Schottky diyotların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Metal-yarıiletken Schottky diyotlar, teknolojik alanda, anahtarlama devreleri, yarıiletken dedektör uygulamaları, modülatör, mikrodalga devre elemanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kısmen kapalı ortamda ve düşük altlık sıcaklıklarında (100 K - 300 K) n-tipi Si polikristal tabanlı Ag/n-Si ikili yapılar, 10^{-5} torr vakum ortamında silisyum yüzeyine gümüş buharlaştırılarak elde edildi. n-Si katmanlar yüzeyinde 100 K - 300 K sıcaklık aralığında üretilen Ag katmanları incelendi. Elde edilen Ag/n-Si ikili yapılarda geçit oluşmasında 354 nm dalga boyuna sahip UV ışınları kullanıldı ve gümüş iyonlarının Si katmanına hareketliliği foto-uyarmalı difüzyon süreci ile gerçekleştirildi. Bu foto-difüzyon sürecinde ikili yapıların 1-5 °C aralığında ısındığı görülmüştür. Böylece bu çalışmada ilk defa ısısal tahribata uğratılmadan oluşumu gerçekleştirilmiş bir Schottky bariyerin karakteristik özellikleri incelendi ve sonuçlar klasik yöntemle (altlık sıcaklığı soğutulmadan) oluşturulmuş yapılarla kıyaslanmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen veriler

kullanılarak yapıya ait idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b), doyma akımı (I_o) gibi çeşitli diyot parametreleri hesaplanmıştır. Bunun yanında altlık sıcaklığına bağlı olarak elde edilen Schottky diyotlarının SEM ve EDS analizlerinin yanında yapısal özellikleri, XRD ile incelenmiştir

Sonuç olarak, bu çalışmada önerilen soğuk altlık yöntemi ile üretilen n-tipi polikristal tabanlı Ag/n-Si yapıların daha ekonomik ve sıcaklığa dayalı herhangi bir bozunuma uğramamış metal-yarıiletken aygıtların üretimi amaçlanmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Bethe (1942), çalışması metal-vakum sistemlerindeki iletkenlikle, metal-yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasındaki ortak noktaları belirledi. En önemli olay termiyonik emisyon teorisinin ortaya atılmasıdır. Bu teoriye göre akım sürüklenme ve difüzyonundan farklı olarak metal içerisindeki elektronların emisyonuyla yoluyla meydana gelmektedir.

Schottky kontaklarda karşılıklı akım taşınımı engel yüksekliğiyle açıklanır. Schottky modeline göre, metalin iş fonksiyonu engel yüksekliğini belirlemede başlıca etkenlerdendir (Sze,1981; Mönch, 1994).

Vakum ortamında silisyum üzerine metal buharlaştırılarak, metal – yarıiletken ikili yapıların elde edilmesi üzerine yapılan çalışmalar 1963 yılında başlamıştır. Silisyum yüzeyi ilk önce belli basınçta oksijene maruz bırakıldıktan sonra 10^{-5} Torr basınçta başka kaynaklardan gelebilecek etkileri önleyecek kadar hızlı Pt, Au, Cu, Ni, Ag, Pd metalleri buharlaştırılmıştır. Elde edilen yapıların engel yükseklikleri hesaplanmış ve oksijene maruz kalmanın engel yüksekliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Archer and Atalla, 1963).

Aboul-Eniem vd. (1998), filmler genellikle $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında sıcak altlık üzerinde hazırlanmaktadır. Filmlerin elektriksel özellikleri film kalınlığı, biriktirme oranı, film yapısı ve altlık sıcaklığı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin hepsini kontrol edip, film direncini güneş pili üretimine uygun hale

getirmek için filmle ilgili birçok önlem alınması gereklidir. CdS filmlerin soğuk altlık ile hazırlanması bu problem için bir çözüm olabilir. CdS film sabit bir buharlaştırma oranı ile buharlaştırılır ve sonrasında film kalınlığına göre 600 °C sıcaklıkta açık havada tavllanır. Bunun sonucunda elde edilen film çalışmıştır.

Belyaev ve Rubets (2001), hem metal hem de yarı iletken malzemelerin kısmen kapalı hacim olmayan klasik ısı buharlaştırma yöntemi ile soğuk altlıklar üzerinde kaplamaları ile ilgili çalışma yapmıştır.

Balyaev vd. (2003), CdTe veCdS filmlerinin büyümesinin ilk aşamalarını 0 °C altındaki sıcaklıklarda deneysel olarak incelediler. 20 – 25 nm büyüklüğündeki adaların yoğunluğunun sürekli arttığını ve ortak bir yönelime sahip olduğunu gözlemlediler.

Ayyıldız vd. (2002), 200 µm ve 400 µm kalınlıklı Au/n-si schottky engel diyotları için idealite faktör değerlerini karşılaştırdılar. 200 µm kalınlıklı diyotta idealite faktörü 1,14 ve 400 µm kalınlıklı diyotta ise 1,12 ve her iki diyot için bulunan engel yüksekliği değerini ise 0,78 eV olarak hesapladılar.

Akkılıç vd. (2003) , ara yüzey tabakalı ve ara yüzey tabakasız Sn/n-Si ikili yapıların I-V karakteristiklerini incelemiştir. Engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün uygulanan gerilimle değişimini hesaplamıştır. Arayüz oksit katmanı (referans örneği) olmayan Sn / n-Si için Φ_b , 0,67 ila 0,59 eV arasında ve idealite faktörü n, 1,34 ila 2,55 arasında değişmiştir. Arayüz oksit katmanı bulunan Sn / n-Si için Φ_b değeri 0,64 ila 0,56 eV arasında ve idealite faktörü n değeri 1,38 ila 2,77 arasında değişmiştir.

Çetinkara vd. (2003), vakum ortamında ürettikleri p-Si yüzeyine Pb buharlaştırılarak Pb/ p-Si Schottky bariyer diyotları elde ettiler. Numuler temizlendikten sonra temiz odada oksijene maruz bırakıldı ve parça üzerinde doğal oksit tabakası oluşturuldu. Bariyer yüksekliğinin havaya maruz süresi arttıkça arttığı belirtildi. Ayrıca doğal oksit tabakasına maruz bırakılan numunelerin arayüzey yoğunluk değerlerinin başlangıçtaki numuneye göre daha düşük olduğunu gözlemlediler.

Bates vd. (2007), Ag/n-Si kompozit filmlerinde transmisyon elektron mikroskobu çalışması yapılmıştır. Magnetron püskürtme yöntemi ile ağır katkılı n – Si yüzeyinde 400 °C'de biriktirilen filmlerde, şekilsiz silisyum içine gömülmüş 5 nm boyutunda çok sayıda Ag parçacığı bulunurken, 550 °C'de hazırlananlar kristalin silikonda gömülü 10 nm boyutunda Ag parçacıklarına sahiptir. Bu malzemeleri içeren önceki çalışmalardan farklı olarak, Ag partikülleri, silikon yüzeyine düzgün bir şekilde dağılmış ve yüzey alanlarında herhangi bir ayrılma olmadı. Bunun nedeni silikon matrisinin ağır katkılanmasıdır ve burada ilk kez rapor edildi.

Bacaksız vd. (2007), altlık sıcaklığı ve kaplama sonrası sıcaklık iyileştirme adımlarının, vakum buharlaştırmayla büyütülen ince film CdTe katmanlarının morfolojik, yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. XRD ve SEM yöntemleri yapısal değişikliklerin çalışılmasında kullanılmıştır. -73 °C ve -173 °C altlık sıcaklıklarında çalışmalar yaptılar.

Yıldırım ve Durumlu (2007), Ag/Azure A/n-Si/Al Schottky diyodların oda sıcaklığında elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri üzerine çalışma yaptılar. Hesaplamaların sonucunda karanlıkta idealite faktörü ve engel yüksekliği I-V ölçümlerinden 1,79, 0,79 eV olarak elde edildi.

Okutan ve Yakupoğlu (2008), Ag/SiO₂/n-Si metal-yalıtkan-yarıiletken diyotun elektriksel karaktersitikleri ve arayüz durum yoğunluk özellikleri akım-gerilim ve empedans spektroskopisi yöntemleriyle analiz edilmiştir. Bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve ortalama seri direnç belirlenerek sırasıyla 0.62 eV, 1.91 ve 975.8 Ω olarak bulunmuştur. Hesaplanan idealite faktörü, Ag/SiO₂/n-Si yapısının, ideal Schottky bariyer diyodundan daha çok metal-arayüzey katmanı-yarıiletken konfigürasyonuna uyduğunu göstermiştir.

Altındal vd. (2009), çalışmasında Au/n-Si schottky diyodunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamış ve engel yüksekliği 0,652 eV ve idealite faktörü 2,878 olarak buldular.

Tomakin vd. (2011a), SnO₂ kaplı cam üzerine sıcak altlık yüzeylerinde kullanılan vakum buharlaştırma yöntemi yerine soğuk altlık yüzeyine CdS numunelerini buharlaştırdılar. Daha sonra yine soğutulmuş CdS örnekleri üzerine Cu buharlaştırması yaparak elde edilen Cu / CdS / SnO₂ yapısının akım – gerilim özelliklerini 100 – 300 K aralığında incelediler.

Yapılan bir çalışma da Au/Anthracene/n-Si/Al Schottky diyodunun engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Anthracene organik tabakası engel yüksekliğinde artışa neden olduğu ve engel yüksekliği 0,87 eV iken idealite faktörü de 2,41 olarak saptanmıştır (Çaldıran vd., 2012).

Yıldırım ve Durumlu (2017), Ag/Azure A/n-Si/Al Schottky diyodların oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülatörde elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri araştırıldı. Hesaplamaların sonucunda karanlıkta I-V ölçümlerinden idealite faktörü 1,79 ve engel yüksekliği 0,79 eV olarak elde edildi.

Hong vd. (2018), ince filmin ayarlanabilir LSPR özellikleri CO₂ lazer ışınlaması ile gerçekleşmiştir. Lazer ışınlamasının örneklerin yapısı, morfolojisi ve optik özellikleri üzerine olan etkileri sırasıyla XRD, SEM, atomik kuvvet mikroskobu, UV-VIS-NIR çift ışınlı spektrometre ve Raman sistemi ile araştırılmıştır. XRD düzeni, lazer ışınlamasının tanecik büyümesi ve Ag ince filmlerin yönlenmesinde etkisi olduğunu göstermiştir. Lazer ışınlama güç artışıyla ışınlandırılan Ag ince filmlerin topografisinin süreksiz yüzey plazma rezonansı görünür bölgesindeki dalgaboyunun kırmızıya kaydığı süreksiz nano-elipsoid yapı geliştirdiği gözlemlenmiştir. Hem çeşitli elipsoid boyutları hem de ışınlandırılmış Ag ince film yığınının durumları artırılmış Raman saçılım yüzeyinin hassasiyetinde belirgin ölçüde artışa katkıda bulunmuştur. Ek olarak sonlu-fark zaman-domeninin simülasyon sonuçlarının deneyle uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

Mahmood vd. (2018), Ag/n-Si teması ve organik ara katmanı temel alan hibrid yapı spin kaplama yöntemi ile parlak mavi boya kullanılarak elde edildi. Daha sonra oda sıcaklığında I – V ve C – V ölçümleri yapıldı. İdealite faktörü, sırasıyla 1,63 ve 1,61 olarak hesaplandı. Bariyer yüksekliğinin büyüklüğü, MS ve MIS tipi yapı için sırasıyla 0,63 ve 0,65 eV olarak belirlenmiştir.

Buldu (2019), soğuk altlık yöntemi ile TiO₂-Ag yapıları üretti ve inceledi. Ag atomlarının eşit boyutlu olmasından dolayı oluşan plazman rezonans olayının kaplamanın daha iyi ve verimli olduğu yönünde çalışmalar yapmıştır. Özel olarak hazırlanan düzenek ile 100-300 K altlık sıcaklığında Ag kaplı örnekler hazırlandıktan sonra örneklerin yüzey ve yapısal özellikleri incelenmiştir. 100-300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Ag katmanında sıcaklığa bağlı olarak tane boyutlarının küçüldüğü bulunmuştur.

1.3. Kuramsal Temeller

1.3.1. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgiler

Si ve Ge gibi önemli yarıiletken malzemeler, elmas yapıda kovalent bağlı kristaller oluştururlar. Mutlak sıfır sıcaklığında en yüksek işgal edilmiş enerji bandı tümüyle elektronlarla doludur. Bu bant, değerlik bandı olarak bilinir. En düşük elektronlarca boş değerlik bandına iletim bandı olarak bilinir. Değerlik bandından tipik olarak 1 eV (yarıiletkenler için; $0 < E_G < 4$ eV) düzeyinde bir değerle ayrılır. Yarıiletken davranış, ($k\varepsilon$ enerji dağılım bağıntıları Şekil 1'de gösterildiği gibi olmak üzere, değerlik bandının tepesine ve iletim bandının tabanına yakın durumlardaki elektronların hareketi ile açıklanır.

Enerjinin bir en yüksek seviye veya en düşük seviyeye yakın durumlar ile ilgilendiği için dağılım eğrisi $\varepsilon(k)$ iyi bir yaklaşıklıkla parabolik olarak alınabilir ve iletim bandı için;

$$\varepsilon = E_G + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (1)$$

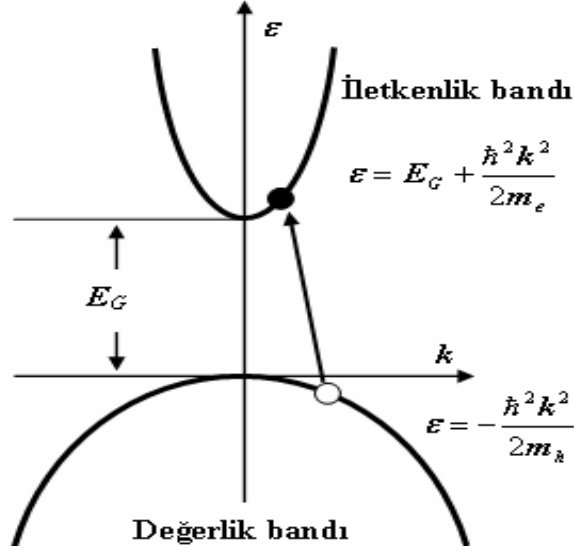
değerlik bandı için,

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} \quad (2)$$

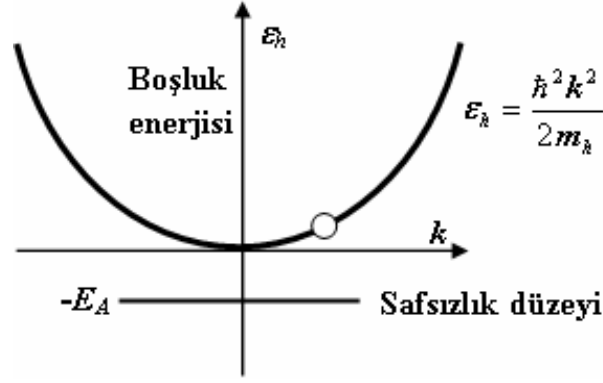
yazılabilir.

Burada, değerlik bandının en yüksek noktası potansiyel enerjinin sıfırı olmak üzere, E_G yasak enerji aralığı enerjisidir. İletkenlik bandının en alt düzeyine yakın elektronlar, bu nedenle, pozitif m_e kütleli serbest parçacıklar gibi hareket ederler. Aynı zamanda değerlik bandında daha alttaki durumlardaki elektronların pozitif etkin kütlelere sahip olmalarına rağmen, değerlik bandının üzerindeki yakın durumda olanlar, negatif bir $-m_h$ kütlelerine sahip gözükmektedirler. Yaklaşık olarak dolu bir değerlik bandının davranışı, doldurulmuş durumları tamamen ihmal ederek ve her bir boş durumun pozitif yüklü e , pozitif kütleli m_h ve yüksek enerjili bir parçacıkla işgal edilmiş olduğu göz önünde bulundurularak hesaplanabilir (Şekil 2). Bu parçacıklara boşluklar (hole) denir.

Bir dış elektrik ve manyetik alanda bu boşluklar sanki pozitif yüklü gibi davranırlar. Yarıiletkende bütün akım iletim bandındaki elektronlardan ve boşluklardan dolayı oluşan katkıların toplamı olarak yazılabilir. Bu nedenle yarıiletkendeki elektron ve boşluklara yük taşıyıcıları denir.



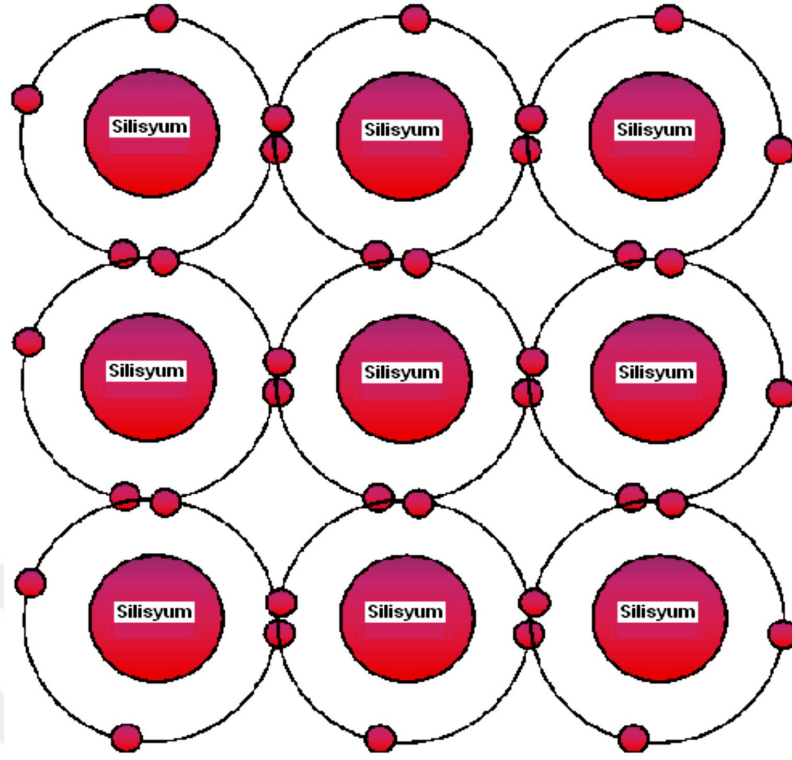
Şekil 1. Değerlik bandının üzerine ve iletim bandının tabanına yakın elektronlar için dağılım bağıntıları



Şekil 2. Değerlik bandı üzerindeki boşluklar için dağılım bağıntısı

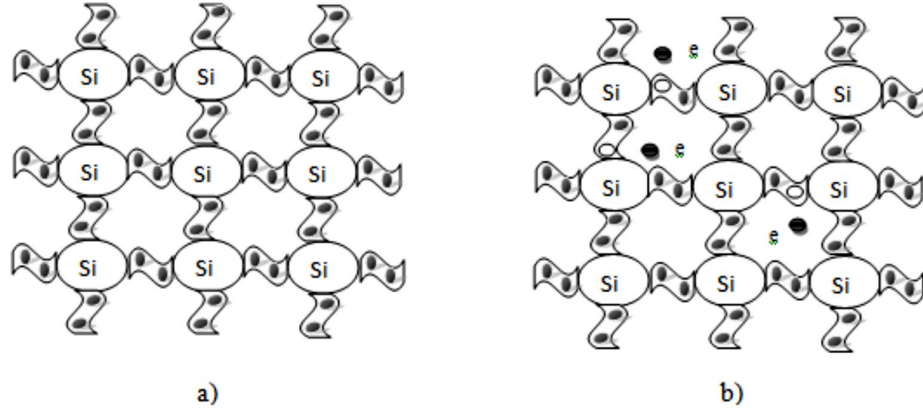
1.3.2. Silisyumun Yapısal Özellikleri

Silisyum, periyodik tablonun 4. grubunda bulunmaktadır ve elektronların dağılımı şöyledir: $Si_{14}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Silisyum atomunun son yörüngesine dört elektron ($3s^2 3p^2$) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her silisyum atomunun 4 valans elektronları ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçiş yapmaktadır. Silisyum örgüsünde her atomun merkezinde ve etrafında 4 komşu atom bulunmaktadır. Silisyumun elmas yapı şekline benzemektedir ve bu yapıda her bir Si atomu 4 komşu Si atomu ile kovalent bağ yapmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi elmas yapıda (000) ve $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$ konumlarında iki atom bulunmaktadır. Elmas yapının hücresinde iki atom ve birim hücresinde de 8 atom mevcuttur (Caferov, 1998).



Şekil 3. Silisyumun bağ yapısı

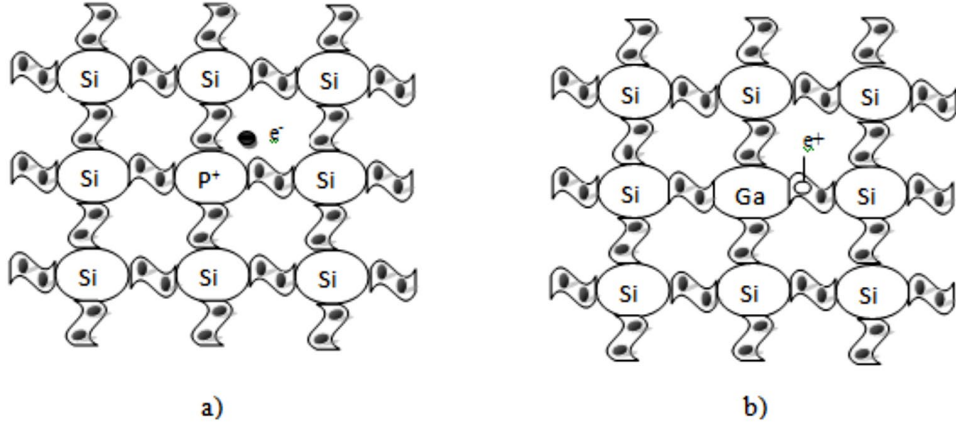
Kovalent bağlarda, mutlak sıfır noktasında elektron yoksunluğundan bahsedilemez (Şekil 3). Kovalent bağlarda ısı enerjisinin etkisiyle beraber kopmalar meydana gelebilmektedir. Bu durumda kopan elektronların serbest kalmasına ve elektronların boşalan yerlerinde delikler oluşmasına sebep olabilir (Şekil 4). Böylece ısısal etkinin sonucunda elektron ve delik çiftleri meydana gelir. Valans bağlarının kopması sebebiyle eşit miktarda serbest elektronların ve deliklerin oluşması özden yarıiletkenler olarak tanımlanır. Özden yarıiletkenlerde yasak bant enerjisi (E_G) ise ana atomlar arası bağların kopma enerjisini veya elektron–delik çiftlerinin aktivasyon enerjisini tanımlar. Dış elektrik alanın özden yarıiletkene uygulanması sonucunda oluşan elektrik akımı da elektron ve delik hareketinden meydana gelir.



Şekil 4. Silisyumda atomlar arası bağların gösterimi a) $T=0$, b) $T > 0$ (Sze M. S., 2007)

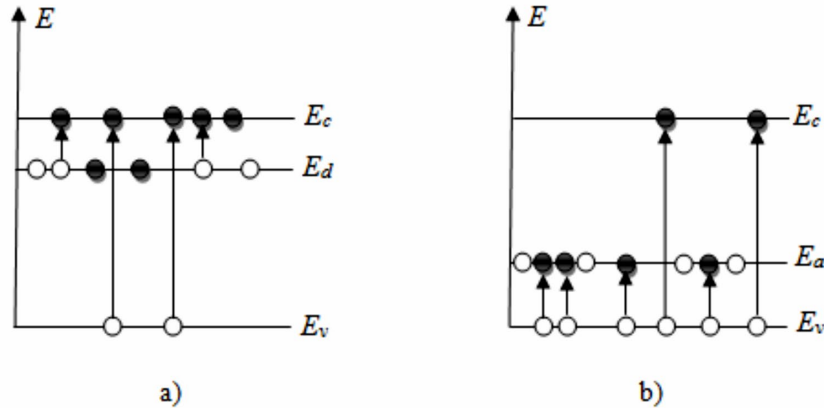
Katkı atomların etkisiyle, yarıiletkenlerin bir çoğunluğunda oda sıcaklığında iletkenlikte değişimler meydana gelir. Katkılı yarıiletken ise iletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere verilen addır.

Katkılı yarı iletkenliğin silisyum yarıiletkeninde oluşma şekli dikkate alınıp, silisyum örgüsünün bir düğümüne beşinci grup atomu olan fosforun P yerleştiği kabul edildiğinde fosforun elektron dağılımı ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$) biçimindedir ve dış (valans) kabuğunda beş elektron ($3s^2 3p^3$) şeklinde konumlanmaktadır. Fosfor atomu silisyum örgüsünün bir noktasını işgal ettiğinde, fosforun dört valans elektronu diğer komşu dört silisyum atomlarıyla kovalent bağ meydana getirmektedir (Şekil 5). Fosforun beşinci elektronunun kovalent bağ kurmaya imkanı yoktur. Çünkü komşu silisyum atomlarının tüm elektronları bağlara yerleşmektedir. Bu nedenle beşinci elektron fosfora düşük güçte bağlıdır, zira bu elektron komşu pozitif yüklü silisyum iyonlarından etkilenmektedir. Alçak sıcaklıklarda beşinci elektron fosfor atomunun çevresinde bulunmaktadır. Bu elektron yüksek sıcaklarda ise fosforun etkisinden kurtulabilmekte ve sonra kristalde serbest hareket edebilmektedir.



Şekil 5. Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü

Fosfor atomu, fosforun iyonlaşması sebebiyle pozitif yüklü iyonla dönüşür. Verici veya donör, yarıiletkendeki elektron veren katkı atomudur. Elektron veya n-tipi yarıiletken ise iletkenliği donör katkısıyla karakterize olan yarıiletkene verilen addır. N-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları delikler olduğu bilinmektedir.



Şekil 6. a) Donör, b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları (Caferov, 1998)

Donör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bant aralığı içinde izin verilen enerji düzeyinin oluşumuna sebep olur (Şekil 6.a). Bu enerji düzeyi iletim bandının tabanından biraz aşağıda yerleşmekte olduğu ve donör tipli fosfor atomunun iyonlaşma enerjisi (ΔEd), yarıiletkenin temel Si atomları arası kovalent bağların kopma enerjisinden (Eg) çok küçük olduğu gözlenmektedir. Şimdi periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan galyum (Ga) atomunun silisyumdaki değişikliklerine bakalım. Galyum atom kabuklarında enerji dağılımı $31\text{Ga} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3d^1 4s^2 4p^1)$ biçiminde olduğu ve valans kabuğunda üç elektron ($4s^2 4p^1$) durumlarında yerleşmekte olduğu gözlenmektedir. Dört

değerlikli Si yarıiletkenine üç değerlikli Ga atomu katkılanırıldığında, komşu silisyum atomlarının birinin bandı işgal edilememektedir (Şekil 6.b). Galyum atomunun dolmamış bağına komşu silisyum atomundan bir elektron geçebilmektedir. Bunun sonucunda, negatif yüklü Ga iyonu oluşmakta ve silisyum bağlarıyla hareket eden delik meydana gelmektedir. Alıcı veya akseptör, yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına verilen addır. Ayrıca iletkenliği akseptör tipi katkıyla şekillenen yarıiletken, delik veya p-tipi yarıiletken şeklinde tanımlanmaktadır. P-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerdir. Azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır. Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandın içinde (valans bandının tavanın üstünde) enerji düzeyi (E_a) oluşturmaktadır (Şekil 6.b) ve küçük oklarla gösterilmektedir. İyonlaşma sonucunda valans bandında serbest delikler oluşmaktadır (Caferov, 1998).

Tablo 1. Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri (Caferov, 1998)

Ergime noktası (°C)	1420
Örgü parametresi (nm)	0,543
Yoğunluk (g/cm^3)	2,33
Yasak bant genişliği, 300 K (eV)	1,1
Elektronların mobilitesi, 300 K ($cm^2/V.s$)	1350
Deliklerin mobilitesi, 300 K ($cm^2/V.s$)	480
Özden yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, 300 K (cm^{-3})	$1,5 \times 10^{10}$
Dielektrik katsayısı	12
Kırılma indisi	3,9

1.3.3. Gümüş Elementinin Yapısal Özellikleri

Elementlerin periyodik tablosunda simgesi Ag şeklinde olan ve parlak, beyaz, değerli bir metalik element olan gümüşün elektron dağılımı Ag_{47} : $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^6 d^{10} 5s^1$ şeklindedir ve atom ağırlığı 107,87 gramdır. Çoğu bileşiklerinde +1 değerliktedir ve kristal yapısı yüzey merkezli kübik şeklindedir (URL-1,2019).

Çeşitli yerlerde, çok yönlü kullanım olanağına sahip olması nedeniyle gümüşün çok değerli bir element olduğu söylenebilir. Bu element ısıyı çok iyi yansıtan,

dövülebilin, esnek bir metaldir ve aynı zamanda elektrik sistemde altıgen olarak kristalleşmektedir. Aynı zamanda gümüşün atmosferde oksitlenmeye karşı büyük bir mukavemet gösterdiği, altından daha kolay, bakırdan ise daha zor oksitlendiği ve asitler ile bazı organik maddelere karşı dayanıklı olduğu söylenebilir. Ama gümüş nitrik asit ve derişik sıcak sülfürik asitte kolayca eritilebilmekte ve kükürt ile birçok kükürt bileşikleriyle hemen birleşebilmektedir.

Tablo 2. Gümüş elementinin bazı özellikleri

Ergime noktası (°C)	960.8
Yoğunluk (g/cm³)	10.5
Isınma Isısı (j/g.K)	0.235
Valans Elektron Potansiyeli (-eV)	11.4

1.3.4. Metal – Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontak, bir metal ile yarıiletken birbirleriyle aracısız olacak şekilde bir araya getirildiğinde oluşan yapıya verilen addır. Kontak yapılacak malzemelerin yüzeylerinin olabildiğince temiz ve pürüzsüz olması, iyi bir kontak yapı oluşturabilmek için oldukça önemlidir. Metal ve yarıiletken kontak yapıldığında, kontak malzemelerinin iş fonksiyonlarının farklı olması nedeniyle fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar metalden yarıiletkene, yarı iletkenden metale yük geçişleri olmaktadır (Ziel,1968).

Metal veya yarı iletken içindeki iyonlar elektronları elektriksel etkileşime maruz bırakılmaktadırlar. Bu sebeple serbest elektronların enerjisi, kristalin içindeki elektronların potansiyel enerjisinden daha büyüktür. İş fonksiyonu da kristalden elektronları dışarı atmak için lazım olan en az enerjiye verilen addır.

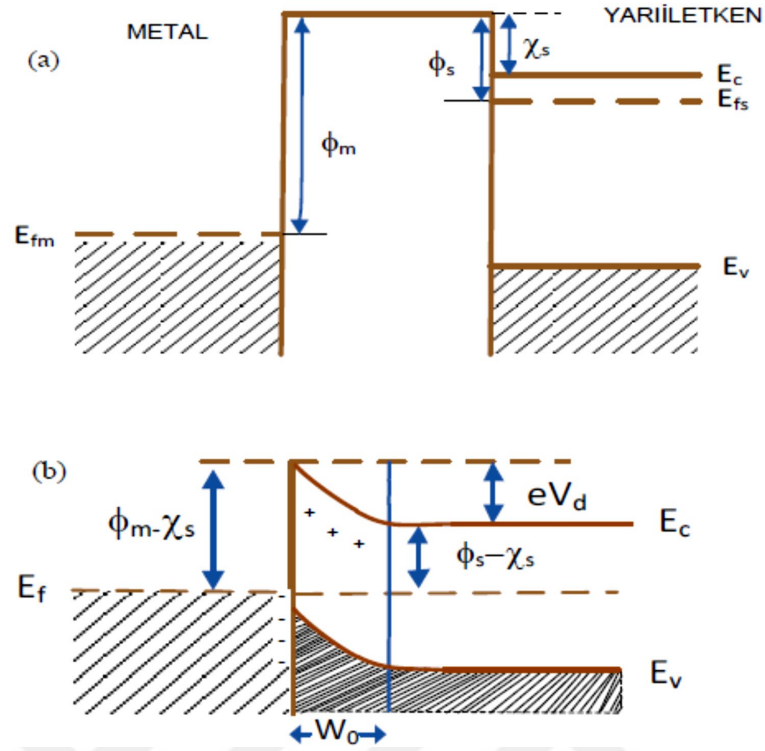
Metalin iş fonksiyonu (Φ_m) da; bir elektronu, fermi seviyesinden metalin yüzeyinin dışına hareketsiz bir hale yükseltmek için lazım olan enerji miktarı diye adlandırılır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) ise; fermi seviyesi ve vakum seviyesi arasında olan enerji farkıdır. Yarıiletkenlerin çoğunluğunun iş fonksiyonu 1 eV ve 6 eV arasında değişim göstermektedir (Rhoderick and Williams, 1988).

Metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrılmasıyla meydana gelen yeni bir dağılım sonucunda bir potansiyel engeli oluşmaktadır. Bahsedilen ara yüzey bölgesi, hareketli yüklerin olmadığı yüksek bir dirence sahip ve yarı iletken tarafında oluşan bir bölgedir. Schottky, metal-yarıiletken ara yüzeyinde potansiyel engel oluştuğunu açıklayan ilk kişidir. Ekleme meydana gelen bu potansiyelin metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasında yer alan fark sebebiyle oluştuğunu ise Mott'un açıkladığı görülmektedir. Schottky-Mott teorisine bakıldığında da potansiyel engeli, metal ve yarı iletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı oluştuğu görülmektedir (Sharma, 1984).

Metal yarı iletken kontakların, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ve yapım tekniklerine bağlı olarak doğrultucu kontak ve omik kontak olmak üzere iki türde olduğu görülmektedir. Bir metalin kontak durumuna getirildiği yarıiletkende önemlidir. Mesela bir altın tel, p-tipi germanyuma kontak edilirse omik kontak meydana gelir; aynı tel n-tipi germanyuma kontak edilirse doğrultucu kontak oluşmaktadır. Bunun nedeninin metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasında oluşan farktan kaynaklandığı görülmektedir.

1.3.4.1. n-Tipi Yarıiletken-Metal Doğrultucu (Schottky) Kontaklar

Doğrultucu kontak, akım taşıyıcılarını bir doğrultudan diğer bir doğrultuya engel potansiyeli sebebiyle hareketi zorlanmadan daha kolay geçiren kontaklara verilen addır. Kontak direncinin dışarıdan uygulanan gerilime bağlı olma durumu, doğrultucu metal-yarıiletken kontakların veya Schottky diyotlarının temel özelliğidir. Bu bağlılığın güçlü olması nedeniyle de , metal yarıiletken kantağı tek yönlü iletkenliğe getirmektedir. Yani kontakta akım kolayca bir yönden ilerler, ters yönden ise zor ilerler. Metal/yarıiletken yapılarda doğrultma işleminin, bu yapılarda akım-gerilim ilişkisine bakılarak incelenebileceği söylenebilir (Sze, 1981). Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ dir (Şekil 7).



Şekil 7. $\Phi_m > \Phi_s$ durumu için metal n-tipi yarıiletken kontağın; a) kontak öncesi enerji-bant diyagramı, b) kontak oluştuğundan sonra enerji-bant diyagramı (Sze, 1981).

Şekil 7.a'da n-tipi bir yarıiletken ve bir metal malzemenin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı görülmektedir. Kontak oluşturulmadan önce metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür. Yarıiletkenin fermi seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) değeri kadarın metalin fermi seviyesinden yüksektir. Bu durum, serbest elektronların sayısının metalde daha az, yarıiletkende daha fazla olduğunu gösterir. Bir elektronun fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkması için gerekli olan enerjiye, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) denir. Yarı iletkenin iş fonksiyonu Φ_s 'de aynı şekilde tanımlanmaktadır fakat metalin iş fonksiyonundan farklı olarak fermi seviyesinde katılanan verici veya alıcı atomların yoğunluğuna bağlı olarak bu enerji değeri değişmektedir. Yarıiletkende katkı miktarına bağlı olmayan önemli diğer bir parametre ise χ_s ile gösterilen elektron yakınlığıdır ve iletkenlik bandının en üst enerji bandı seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır (Sharma, 1984). Şekil 7.b'de bir metal/n-Si yapının kontak sonrası enerji bant diyagramı görülmektedir.

Kontakt oluştuktan sonra yük alışverişi başlamakta ve yarıiletken den metale olacak şekilde elektron geişleri olmaktadır. Yarıiletkenin yüzey tabakasından devinim eden elektronlar, geride iyonize hale gelmiş donörler bırakmaktadırlar. Yarıiletken tarafında yer alan elektron sayısı azalırken, metal malzemenin yer aldığı kısımda pozitif yüzey yükleri artmaktadır. Yük alışverişi olduktan sonra yarıiletkenin enerji seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar düşmüş olur. Termodinamik denge halinde her iki sistemin Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelmektedir (Rhoderick and Williams, 1988; Ziel, 1968).

Böylelikle yarıiletkenin enerji band sınırına yakın kısmında serbest elektron konsantrasyonunun düşmesi sebebiyle yarıiletkendeki fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başlamaktadır. Bu sebeple iletkenlik band kenarı E_c ile fermi seviyesi E_F arasında oluşan fark elektronların yoğunluğu ile artar ve termal dengeye ulaştığında E_F tamamen sabit kaldığı için de iletkenlik ve valans band kenarları Şekil 7.b' deki gibi bükülür (Sharma, 1984).

Kontakta potansiyel engelin oluşmasına sebep olan bir neden de yarıiletken tarafında yer alan uzay yükleriyle metal tarafında oluşan yüzey yüklerinin oluşturduğu dipol tabakasıdır.

Engel potansiyelinin yarıiletken tarafındaki değeri (Sze, 1981);

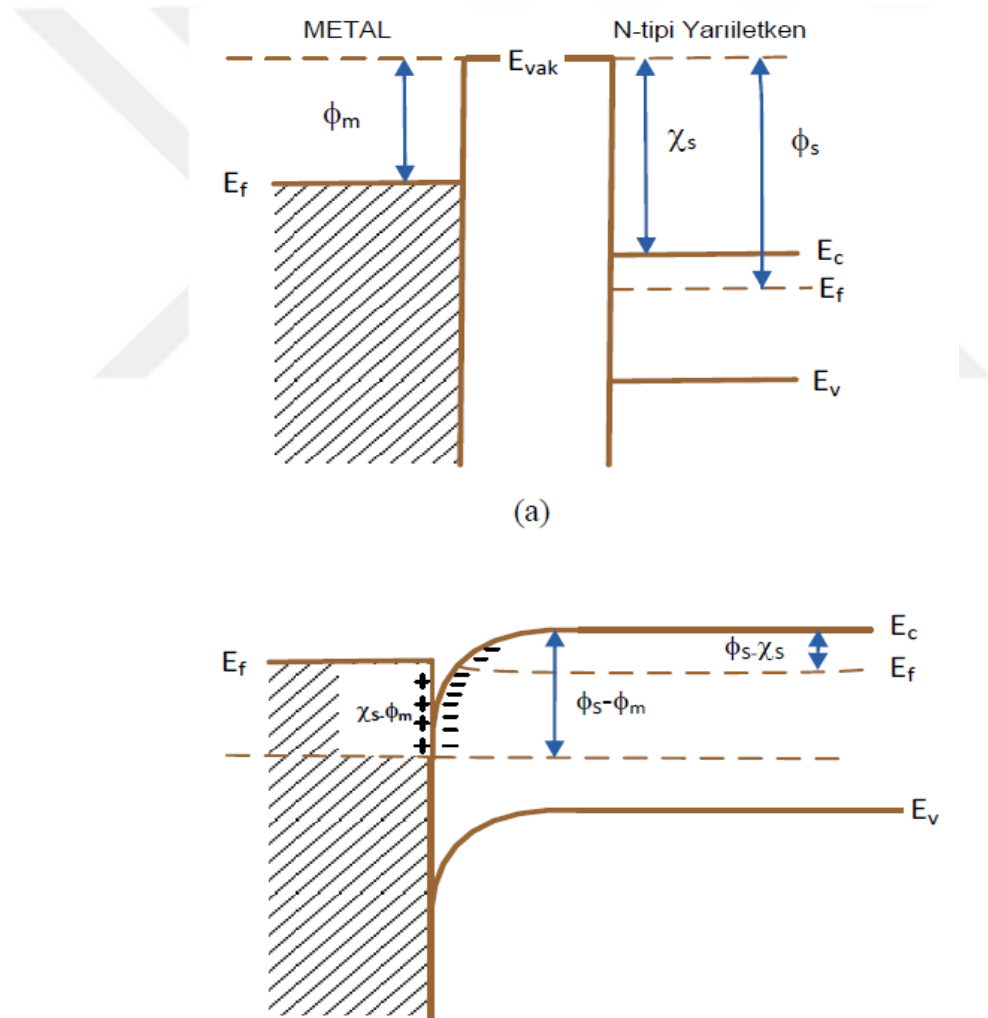
$$eV_d = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (3)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Bu ifade de V_d difüzyon potansiyelidir. Metal tarafında dik şekilde yükselen potansiyel engeli, yarıiletken tarafında d genişliğine sahiptir. Yarıiletken tarafında d genişliğinde yüklerden arınmış olan 'Schottky bölgesi' oluşur. Bu ara bölge sığa niteliği göstermektedir ve bir kondansatör şeklinde davranmaktadır. Bu nedenle bu bölgeye Schottky kapasitesi de denilmektedir. Schottky kapasitesi bu tabakanın kalınlığına, tabaka kalınlığı ise iyonize olmuş donör yoğunluğuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlı olacak şekildedir (Rhoderick and Williams, 1988).

1.3.4.2. n-Tipi Yarıiletken-Metal Omik Kontaklar

Omik kontak, metal/n-tipi yarıiletken kontak oluşumu için ($\Phi_m < \Phi_s$) şartı sağlanır ise oluşmaktadır (Neamen, 1992). Akım-voltaj karakteristikleri Ohm yasasına uygun olacak şekilde davranış sergilerler.

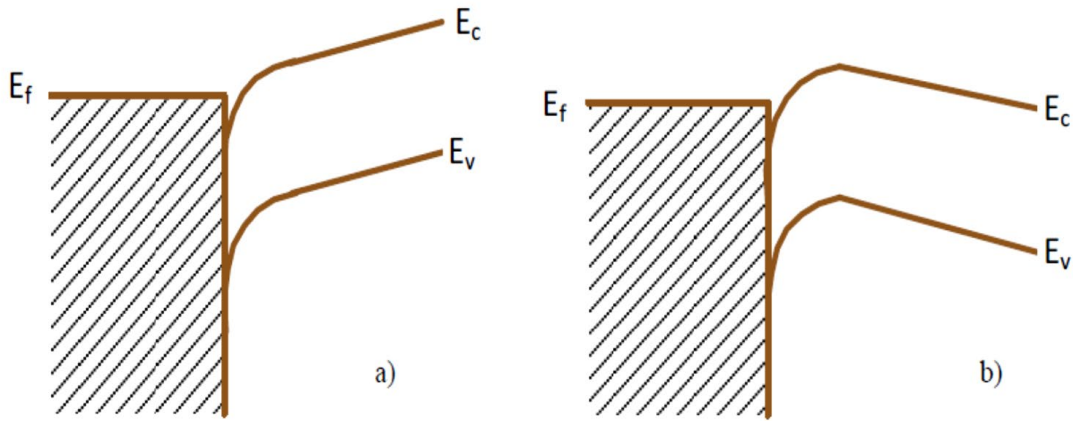
Bir metalin n-tipi bir yarıiletken ile yapmış olduğu omik kontak Şekil 8’de görülebilmektedir. Kontak oluşturulmadan önce metalin Fermi düzeyi, yarıiletkenin fermi düzeyinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar üstündedir (Şekil 8.a).



Şekil 8. Metal/n-tipi yarıiletken omik kantağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakdan önceki b) Kontakdan sonraki durumları

Kontakt sırasında elektronlar metalden yarıiletkene olacak şekilde arkada pozitif yüzey yükleri bırakarak ilerlerler. Bu vaziyet fermi seviyeleri eşit hale gelene kadar devam etmektedir. Denge haline ulaşıldığı zaman yarıiletken tarafında yer alan fermi enerji düzeyi ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar üste bükülmektedir (Şekil 8.b). Metal üzerinde pozitif ve yarıiletken üzerinde negatif yüzey yükleri oluşmaktadır. Bu şekilde bir kontakta potansiyel engel yüksekliği oluşmamaktadır ve kontakta her iki yönde de basitçe yük geçişi olmaktadır.

Bir V voltajı uygulanır ise bu potansiyel farkı kontak bölgesinde yarıiletken boyunca dağılım gösterecektir. Yarıiletkene pozitif ve metale negatif gerilim uygulanır ise metalde yer alan elektronlar yarıiletken tarafına geçiş gösterirler (Şekil 9.a).



Şekil 9. Ters ve düz beslem durumlarında omik kontakın enerji-bant diyagramları:
a) $V < 0$ durumu b) $V > 0$ durumu (Sze, 1981)

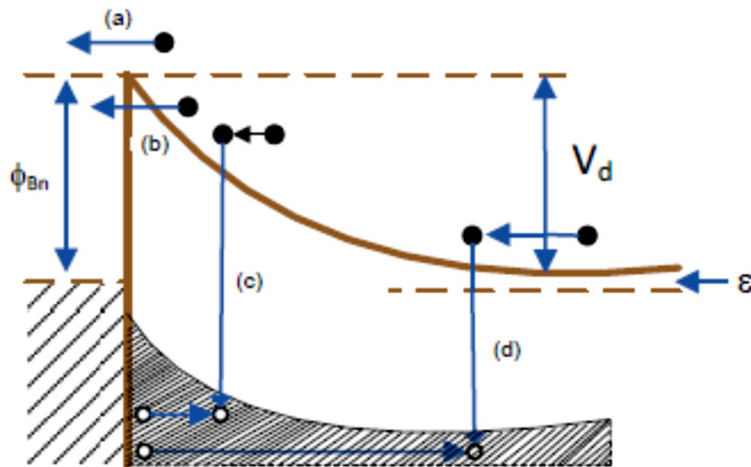
Eğer metal tarafına $+V$ gerilim uygulanır ise, yarıiletkenden metale doğru ilerleyen elektronlar için bir engel bulunmadığından elektronlar rahatça hareket edebilmektedirler. Yarıiletken tarafına bir $+V$ gerilimi uygulanır ise de, yarıiletkenin yüksek katkı hali sebebiyle elektronlar için engel yüksekliği çok az olmaktadır. Yine elektronlar yarıiletkene doğru rahatça hareket etme imkânı bulabilirler. Bu açıdan elektronların her iki yönde de rahatça hareket etme imkânına sahip olduğu kontak haline omik kontak denir.

1.3.5. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken ikili yapılarda akım iletiminin birincil olarak çoğunluk taşıyıcılarıyla gerçekleşmesi sebebiyle akım iletiminin azınlık taşıyıcılarıyla gerçekleştiği p-n ekleminden farklılık gösterir. Kontakta ara yüzey halleri, seri direnç, metal ile yarıiletken arasında olan oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi etkenlerin Schottky diyotlardaki etkisine önem vermek, hangi durumda, hangi iletim mekanizmasının oluştuğunu saptamak, elde edilen verilerin doğruluğu bakımından önem arz etmektedir. Sıcaklık, ara yüzey halleri, seri direnç ve metal ile yarıiletken arasında yer alan yalıtkan tabaka sebebiyle akım iletim mekanizması MS ve MIS yapılarda değişiklik göstermektedir.

MS ve MIS yapıları kontaklarda birincil akım-iletim mekanizmaları (Henisch, 1984) :

- Termoionik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termoionik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme Termoionik Alan Emisyonu (TAE)
- Alan Emisyonu (AE), Çok katlı tünelleme
- Yüksüz bölgede yeniden birleşme
- Deşik enjeksiyonu şeklindedir.



Şekil 10. Bir metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi

Şekil 10’da belirtilen metal/n-Si eklem yapısında akım iletim mekanizmaları şu şekildedir:

- (a) Normal sıcaklıklarda Schottky diyotlarda, elektronların. Potansiyel bariyeri aşarak metale geçmesi dominant bir işlemdir.
- (b) Elektronların oluşan engel içinden kuantum mekaniksel tünellemesi (yüksek katkılı yarıiletkenler için önemli bir olaydır ve çoğu omik kontakta sorumludur).
- (c) Uzay yükü bölgesinde oluşan rekombinasyon olayı bir p-n eklemindeki rekombinasyon işlemine benzerlik gösterir.
- (d) Metalden yarıiletkene olan deşik enjeksiyonunun oluşturduğu akımdır.

Schottky ve Spenke ‘nin difüzyon teorisi ve termiyonik emisyon teorisi, metal – yarıiletken Schottky diyotlarında akım iletimini açıklamaktadır. Asağıda bu teoriler kısaca açıklanacaktır (Schottky ve Spenke, 1970).

1.3.5.1. Termoyonik Emisyon Teorisi (TE)

Elektron ve deliklerin, dinamik bir metal yüzeyinden salınması Termoyonik Emisyon Teorisi olarak bilinmektedir. Schottky kontaklarda taşıyıcıların yeterli miktarda termal enerjiye sahip olmasıyla, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale potansiyel engeli aşarak geçme temeline dayanmaktadır (Crowell vd., 1966).

Metal-n tipi yarıiletkenlerde akım oluşumu elektronlar sayesinde , metal-p tipi yarıiletkenlerde ise delikler sayesinde oluşmaktadır (Ziel, 1968 ; Bengi vd., 2007).

Termoyonik emisyon teorisi varsayımları ise şu şekildedir:

1. kT/q enerjisi, potansiyel engelin yüksekliğinden küçüktür.
2. Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmadığı bilinmektedir. Bu açıdan taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır denilebilir.
3. Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte, engelin şekli önemsiz olup akım engel yüksekliğine bağlılığı zayıftır (Sze 1981; Sharma 1984).

Doğrultucu kontağın potansiyel engel yüksekliğinin kT 'den daha iri ve taşıyıcıların arınma bölgesindeki çarpışmalarının da çok ufak olduğu Maxwell-Boltzman yaklaşımına göre kabullenilerek, termo iyonik emisyon teorisinde, termal denge şartının kontak oluşumundan etkilenmemesi sağlanmaktadır.

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru beslemede iken engel yüksekliği düşmesi sebebiyle, akım yoğunluğu değeri $\exp(eV/kT)$ ile orantılı olacak şekilde artacaktır. Böylelikle yarıiletkenden metale olacak şekilde akım yoğunluğu $J_s \rightarrow m$ yarıiletkenden metale doğru akan toplam akım yoğunluğu,

$$J_s = [A^* T^2 \exp(\frac{-q\phi_B}{kT})][\exp(\frac{qV - IR_s}{nkT})] \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Genel olarak J ifadesi;

$$J = J_o [\exp(\frac{qV_a}{kT}) - 1] \quad (5)$$

şeklinde dir. Doyma akımı yoğunluğu,

$$J_s = A^* T^2 \exp(\frac{-q\phi_B}{kT}) \quad (6)$$

ile verilir (Sze, 2007). ϕ_B Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azalması göz önünde bulundurulduğunda eşitlik,

$$I_o = A^* T^2 \exp(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}) \exp(\frac{-q\phi_B}{kT}) \quad (7)$$

halini alır. Bu ifadede, ϕ_B Schottky engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir. Bu sabit,

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^2} \quad (8)$$

ile verilir. (8) eşitliğinde q ; Elektron yükü, h ; Planck sabiti ve m_n^* ; Elektronun iletkenlik bandı içindeki etkin kütesidir (Sze, 2007).

1.3.5.2. Difüzyon Teorisi

Difüzyon, yük yoğunlukları farklı olan iki bölge arasında, konsantrasyonun daha fazla olduğu bölgeden konsantrasyonun az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçiş olayına denir. Schottky tarafından ileri sürülen difüzyon teorisinin dayandığı hipotezler aşağıdaki gibidir:

1. kT/q enerjisi, potansiyel engelin yüksekliğinden küçüktür.
2. Tüketim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi göz ardı edilemez.
3. $x=0$ ve $x=w$ deki taşıyıcı yoğunlukları, akımdan etkilenmemiştir (bu açıdan onlar termal denge değerine sahiptir denilebilir.)
4. Yarıiletkendeki safsızlık yoğunluğu dejenere değildir.

Bu kabuller istikametinde tüketim bölgesindeki akımın, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlılığından dolayı akım yoğunluğu denklemi kullanılır. Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = qD_n \left[\left(\frac{qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (9)$$

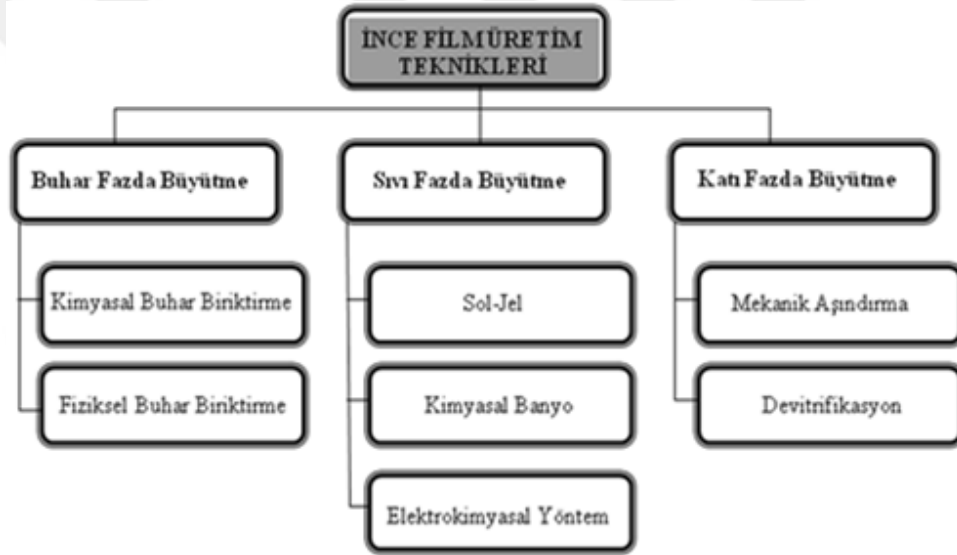
biçimindedir. Bu ifade de $n(x)$ elektron yoğunluğu μ elektron mobilitesi, D_n elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik alanıdır. Dolayısıyla difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (10)$$

şeklinindedir. Difüzyon teorisindeki doyma akım yoğunluğu (J_{SD}), gerilim ile daha hızlı değişir ama TE doyma akım yoğunluğuna göre sıcaklığa daha az bağlıdır.

1.3.6. İnce Film Elde Etme Yöntemleri

İnce film elde etmenin metodları kuru ve nem şeklinde olmak üzere iki ana başlık altında sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerinde fiziksel buhar biriktirme (physical vapor deposition) ve kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition) şeklinde olduğu bilinmektedir (Sönmezoğlu vd., 2012). Kaplama yönteminin saptanmasında da sıcaklık, kaplama yapılacak malzeme, altlık olarak kullanılacak malzeme, numunenin kaplandıktan sonraki çalışma ortamı gibi etkenlere önem verilir. Bu çalışmada ise PVD yöntemi ile buharlaştırma gerçekleştirilmiştir. Çeşitli ince film üretim yöntemleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. İnce film üretim teknikleri şeması

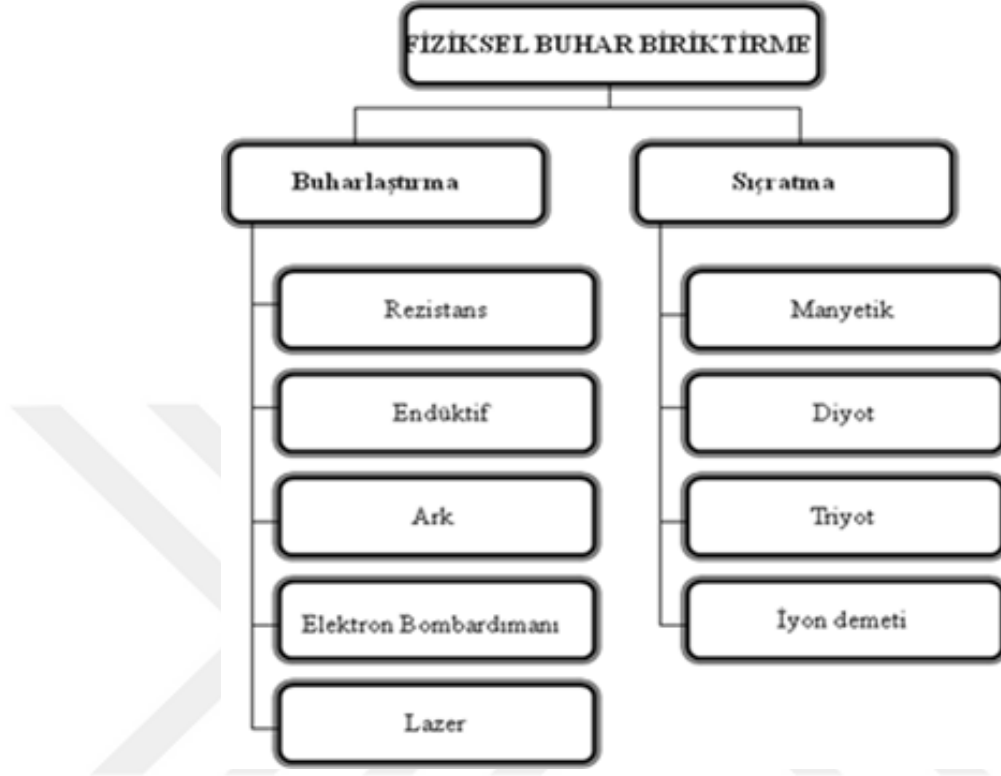
1.3.7. Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) Yöntemi

İnce filmlerin vakumda altlık yüzeyinde oluşturulması üç süreçten oluşmaktadır:

- 1) Kaplanan malzeme atomlarının üretimi ve altlığa doğru olan akışın yönlendirilmesi.
- 2) Atomların vakum ortamında altlığa kadar geçişi.
- 3) Atomların altlık yüzeyine çökmesi ve ince film tabakasının oluşmasıdır.

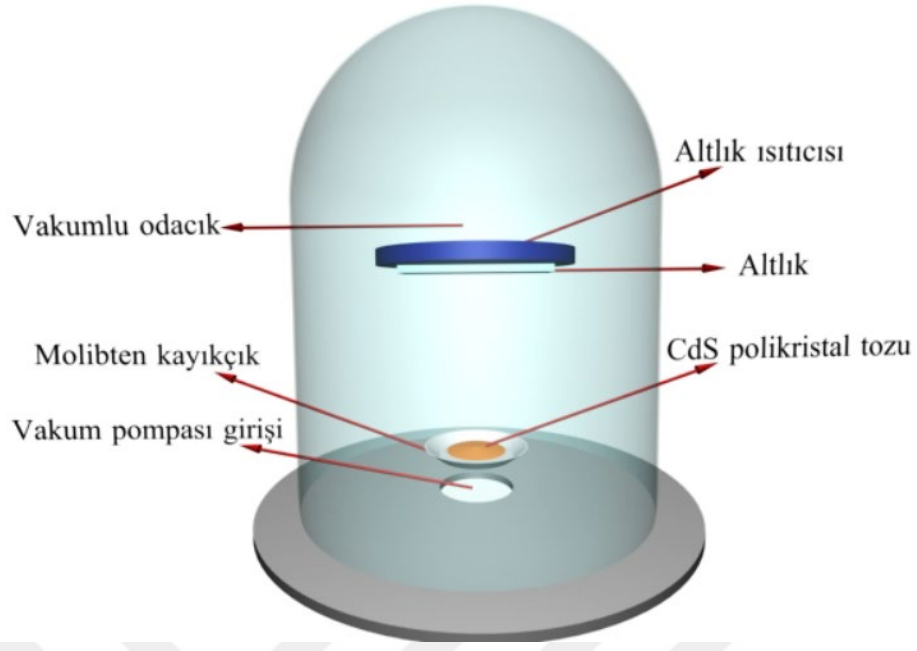
“Buharlaştırma” ve “Sıçratma” olmak üzere iki başlıkta incelenen, vakum ortamında kayıkçıktaki malzemenin buharlaştırılarak ya da sıçratma tekniği ile atomların

koparılması ve yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi temeline dayanan FBB kaplama yöntemi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 12. Fiziksel buhar biriktirme yöntemi şeması

Şekil 12 buharlaştırma yöntemini göstermektedir. Bu yöntem de malzeme ısıtılarak atom ve moleküllerden oluşmuş gaz haline getirilmektedir. Gaz durumundaki malzeme altlık yüzeyine çökerek ince film halinde kaplanmaktadır. Bu yöntem aracılığı ile optik olarak düzgün filmler basitçe elde edilebilirken, stokiometrik filmleri elde etmek zordur (Bouchenaki vd., 1991).

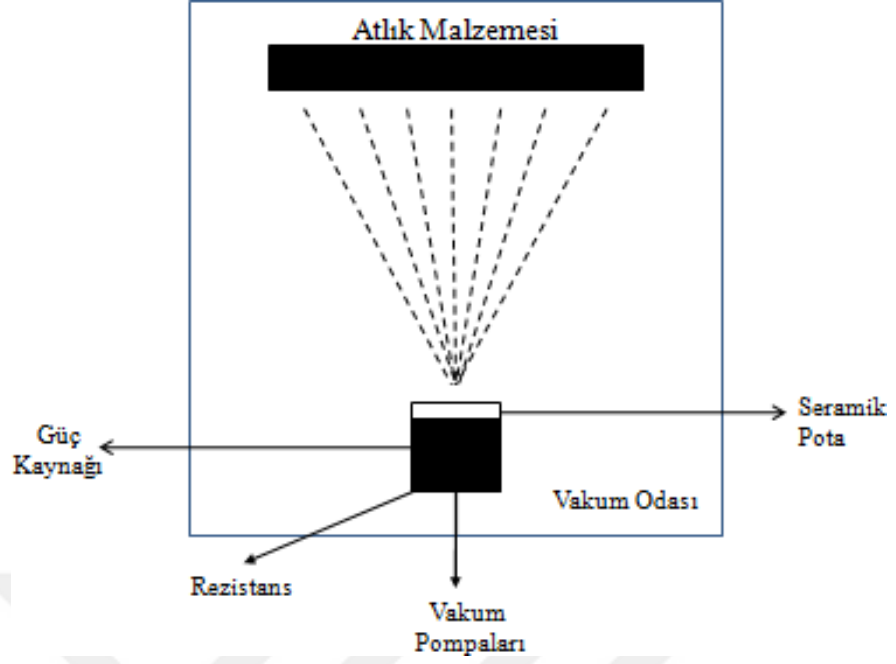


Şekil 13. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Bouchenaki vd., 1991)

1.3.7.1. Rezistans ile Buharlaştırma

Rezistans ile buharlaştırma metodunda, oksidasyona ve sıcaklığa karşı direnci fazla refrakter pota içerisine altlık yüzeyine kaplanacak malzemenin yerleştirilmesi ve pota çevresine sarılmış rezistans teller desteğiyle ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Pota malzemesi olarak çoğunlukla tungsten ve tantal gibi refrakter metallerin seramik kompozitin kullanıldığı bu yöntemden Al, Mg, Ag, Cu gibi düşük erime sıcaklığına sahip malzemelerin buharlaştırılır.

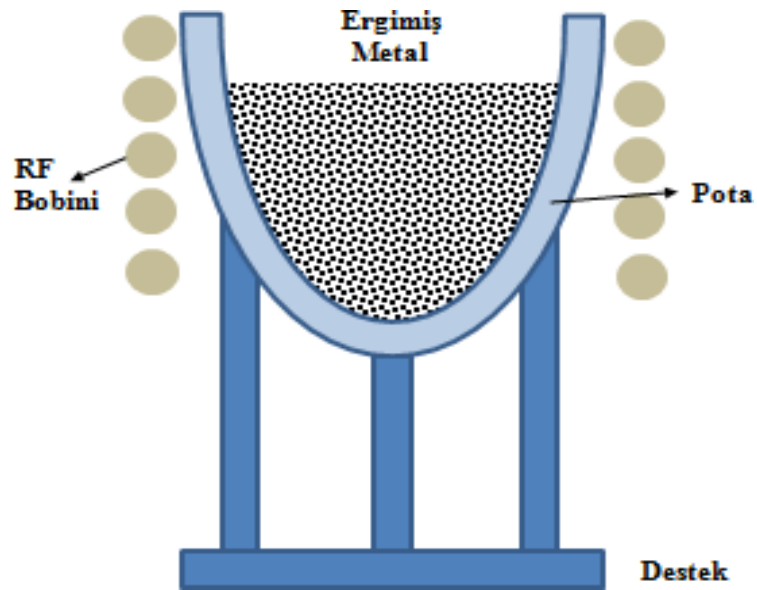
Hızlı bir FBB işlemi olan rezistans ile buharlaştırma işlemi aynı zamanda yüksek akım ve düşük potansiyel veren enerji sistemlerinin kullanıldığı, maliyeti düşük bir FBB işlemidir. İyonlaşmanın çok az olması sebebiyle rezistans ile buharlaştırma yönteminde kaplamanın yüzeye bağlanabilirliği düşük, gözenekliliği ise yüksek olduğu bilinmektedir. Optik ve dekoratif amaçlı uygulamalarda sahip olunan kaplamaların daha fazla kullanıldığı söylenebilir (Wasa, 1992).Şekil 15’de rezistans ile buharlaştırma yöntemi gösterildi.



Şekil 14. Rezistans ile buharlaştırma yöntemi

1.3.7.2. Endüktif ile Buharlaştırma

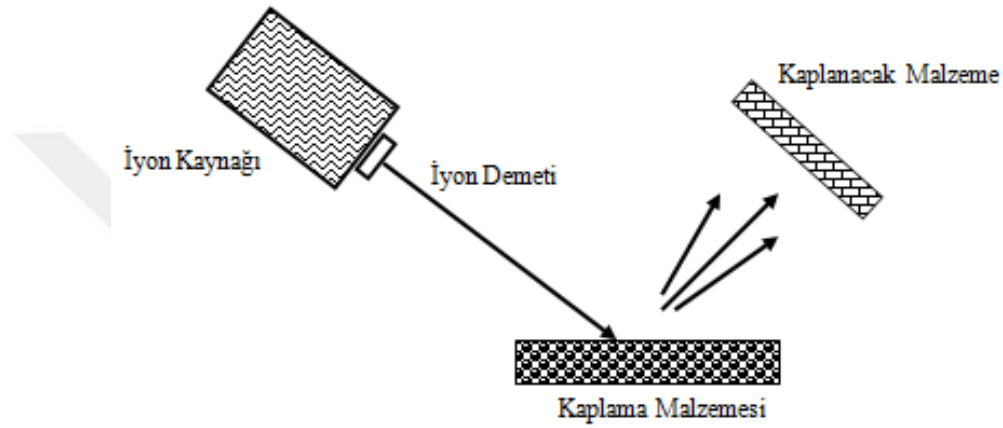
Endüktif yöntem ile yapılan buharlaştırmalarda, potanın etrafı su soğutmalı olacak şekilde sarılmış bakır tellere uygulanan indüksiyon akımı (RF akımı) sonucunda oluşan ısı neticesinde buharlaştırma olmaktadır. Fakat bu yöntemde yüksek maliyetlerin oluşması mühim bir dezavantajdır (Wasa, 1992).



Şekil 15. Endüktif ile buharlaştırma tekniği

1.3.7.3. İyon Demeti ile Sıçratma Tekniği

İyon demeti ile sıçratma tekniği diğer bir sıçratma yöntemidir ve bu teknik yüksek basınçlarda çalışma olanağı verir. Bu teknik hedefin dolaylı olacak şekilde bağımlı bir iyon kaynağı sayesinde bombardımana uğratılması ile sıçratılması prensibine dayanmaktadır. Bahsedilen iyon demeti ile sıçratma yöntemi Şekil 16’da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 16. İyon demeti ile sıçratma

“Kaufman kaynağı” ve “Duoplasmatron” en çok kullanılan iyon kaynaklarıdır. Duoplasma iyonların ark boşalması sağlanarak meydana getirilmektedir ve kullanılan eski bir iyon kaynağıdır. Kaufman’ın ise son senelerde kullanılan bir iyon kaynağı olduğu söylenebilir.

Sıcak filaman katoda sahip Kaufman iyon kaynağında plazma meydana getirilerek iyonlara sahip olunmaktadır. Yüksek gaz basıncında çalışma zorunluluğu, iyon demetinin çapının (~1 cm) küçük olması ve bu sebeple biriktirme hızının az olması, iri yüzey alanına sahip malzemelerin yüzeylerinde aynı kalınlıkta film oluşturulamaması iyon demeti ile sıçratma yöntemin dezavantajlarıdır (Wasa, 1992)

Kaplama teknolojisinde, bazı üstün nitelikleri nedeniyle PVD prosesleri önemli bir yer kaplamaktadır. Bu nitelikler aşağdaki gibidir:

1. PVD teknolojisi ile teorik olarak bütün metal, alaşım, seramik ve polimer kaplamalarına sahip olma imkanı vardır. Bu açıdan aşağı yukarı her kaplamanın, her taban malzeme üzerine biriktirilebileceği söylenebilir.
2. PVD teknolojisi ile kaplamalarla birlikte saç ve folya gibi parçalar da biriktirilebilmektedir.
3. Kaplamalar çok iyi yapışma niteliğine sahiptirler.
4. Biriktirme hızı süresi olabildiğince geniştir; bu nedenle üretim hızı yüksektir.
5. Kaplama ardından yüzey pürüzlülüğü, taban malzemenin yüzey pürüzlülüğüyle yaklaşık olarak aynı olması nedeniyle, kaplama sonrası zımparalama ve parlatma gibi yüzey işlemlerine gerek duyulmamaktadır.
6. PVD süreçlerinin hiçbirinde, çevre sorunlarına neden olan zehirli atıklar oluşmamaktadır.
7. Kontrol edilebilir vakum ortamı ve saf kaynak malzemelerinden yararlanılması sebebiyle yüksek saflıkta birikimler elde edilebilmektedir.

1.4. İnce Film Oluşumu ve Büyüme

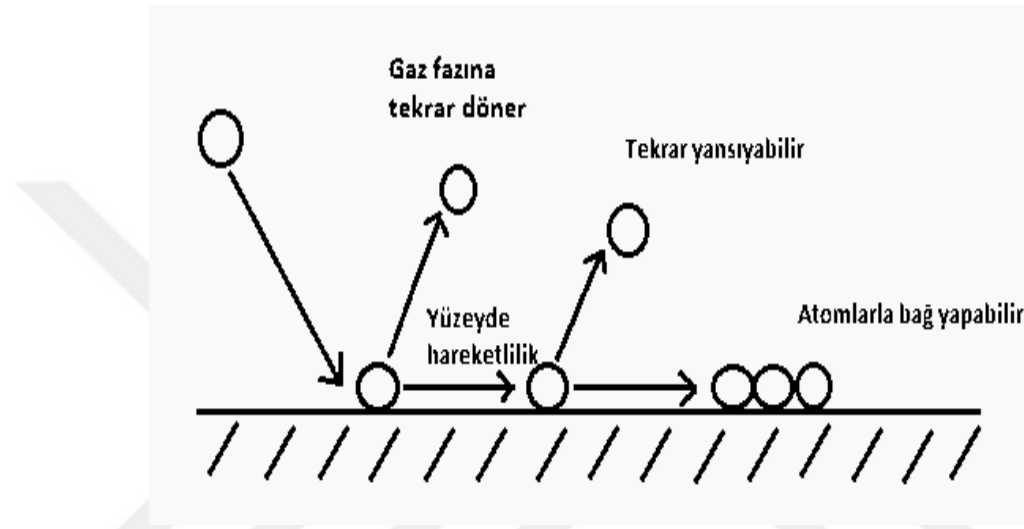
İnce filmler, farklı üretim yöntemleri kullanılarak buharlaştırma yapılacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine kaplanması ile ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları genel olarak birkaç mikrometreden birkaç Å'a kadar olan malzemelerdir.

Genellikle dört aşamalı dinamik bir proses oluşur:

- a) İlk olarak yüzeyde tek atomlar çekirdeklenir. Şayet yüzeyde atom hareketliliğinin süresi diğer bir atomla buluşacak kadar yeterliyse, buharlaştırmadan önce bu atomlar bir araya gelirler.
- b) Atom çiftlerinden birini buharlaştırmaya yetecek enerji, tek bir atom için gerekli enerjiden yüksekse, yüzeyde kararlı adacıklar oluşmaya başlar.
- c) Adacıklar birleşir.
- d) En sonunda oluşan film büyür.

Altlık üzerine gelen bir atom enerjisini yüzeye aktarır ve yeterli momentumun yayılması sonucunda zayıf bir bağ ile tutunur, bu durum fiziksel adsorbsiyon olarak bilinir. Bu alışverişte gelen atomla altlık atomu arasında meydana geliyor. Bu etkileşimde iki durum söz konusudur.

- Yüzeyden esnek olarak yansır.
- Yüzeyde yüzeysel difüzyon yaparak birikir.



Şekil 17. Gelen atomun altlıkla etkileşmesi

Parçacıkların altlık yüzeyinde ısının etkisi ile konaklamasını karakterize etmek için belirlenen konaklama katsayısı (a_t), gelen atomun yüzey atomu ile etkileşmesinde altlık atomuna aktarılan enerji miktarıdır. Bu enerji alışverişine “Isısal Enerji Alışverişi” de denir.

$$a_t = \frac{E_{\uparrow} - E_{\downarrow}}{E_{\uparrow} - E_A} \quad (11)$$

E_{\uparrow} : Altlık yüzeyinden yansıyan ve gaz fazına dönen atomların enerjisi

E_{\downarrow} : Altlık yüzeyine gelen atomların enerjisi

E_A : Altlığın enerjisidir

a_t 'nin maksimum değeri 1'dir. Eğer $E_A = E_{\uparrow}$ olursa $a_t = 1$ oluyor. Bu ise altlık yüzeyine gelen tüm atomların konaklaması anlamına geliyor. Buna "tam enerji alışverişi" diyoruz. Fakat deneyimler $a_t < 1$ olduğu durumlarda (kütlelerin eşit olmadığı durum) daha kaliteli filmlerin oluştuğunu göstermektedir. Gelen atomların altlık yüzeyinde tam olarak konaklayabilmesi için;

$$E \downarrow < 25 E_A \quad (12)$$

bu şartın ödenmesi gerekiyor. E_A (aktivasyon enerjisi) her malzeme için farklıdır. Eğer gelen atomun kütlesi altlık atomunun kütlesinden küçük ise konaklama olasılığı çok düşüktür. (Serbest Gibbs Enerjisi)

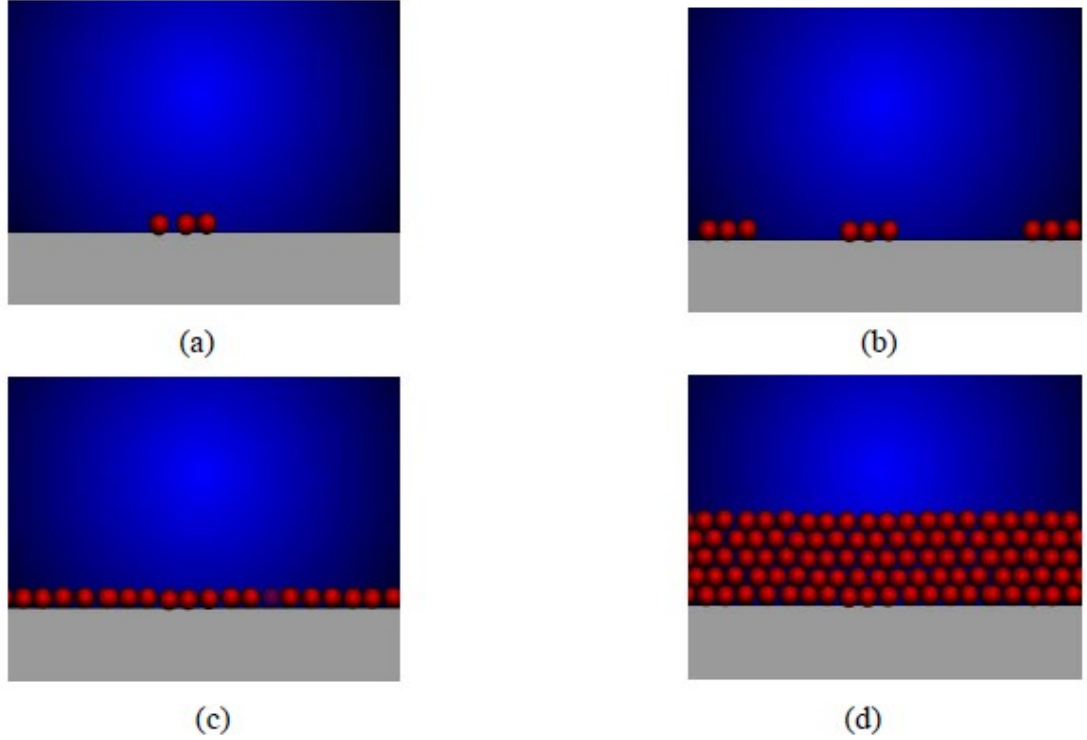
Altlık yüzeyine gelen yeterli sayıdaki buhar atomu veya molekülü altlık üzerinde kalıcı bir tabaka meydana getirir. Altlık yüzeyinde filmler iki büyüme aşamasında gerçekleşir.

a. Zigot oluşum aşaması: Bu aşamada altlık yüzeyinde büyüme özellikli kritik boyutlu zigotlar oluşur. Gaz fazında atomların hücreler tarafından emilmesi olayı gerçekleşir. Altlık yüzeyinde hücre-hücre etkileşmesi bu hücrelerin kaynaşmasına neden olmaktadır. Hücrelerin dış görünüşü genelde elipsoid, küresel vb. şekilde olmaktadır. Bu mekanizmada film büyümesi iki veya üç boyutlu zigotların oluşumu ve daha sonra bunların kaynaşması ile meydana gelir.

b. Filmlerin büyüme aşaması: Bu aşamada zigotlar büyüyerek birbirleri ile kaynaşır ve altlık yüzeyini homojen olarak kaplarlar. Altlık yüzeyinde oluşan zigotlar zamanla büyüyerek adacıkları oluşturur. Bu adacıklar farklı geometrik görüntülerde olur ve bu süreç içerisinde birbirleriyle temas geçerek uzaysal bir ağ oluştururlar. Kaynaşma süreci ilk aşamada çok hızlı gerçekleşirken daha sonraki süreçlerde yani uzaysal ağ oluştuktan sonra kaynaşma hızı düşer.

Bu mekanizma katmanlı altlık yüzeyinde gerçekleşiyor. Bu basamaklı altlıklar pürüzlü altlık yüzeylerinden kaynaklanıyor. Böyle bir altlık yüzeyine gelen atomlar

basamakların köşesinde hareket eder ve bu basamakların belli bölgelerinde atomik kümeler oluştururlar.



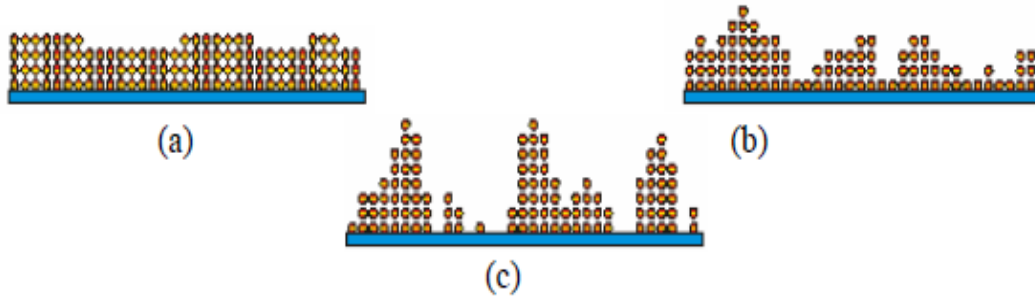
Şekil 18. Kaplama sırasında filmin büyümesi (URL-2, 2019)

Sıcaklık arttıkça kaynaşmada bir düşüş gözükür. Bilindiği gibi yüksek sıcaklıklarda parçacıkların etkileşme süreci yüzeyde bir hareketliliğe neden olur. Bu hareketlilik yüzeyde boş bölgelerin oluşumuna neden olur. Böylece, yüzeyde ikinci bir hücre oluşum süreci başlar.

Basınç, altlık sıcaklığı, kaplama hızı, atomların enerjisi gibi parametrelerin değiştirilmesiyle yüksek saflıkta, yüzey pürüzlülüğü düşük sıkı paketlenmiş kaliteli filmler oluşturulabilir.

Film gelişimi kaplama koşullarına bağlı olarak değişir. Film gelişimi hakkında geliştirilmiş üç ana model bulunmaktadır:

- 1) Boyutlu adacık büyümesi (Volmer Weber)
- 2) Atomik katmanlar şeklinde büyüme (Frank Van Der Merwe)
- 3) Ara model (Stranski – Krastanov)



Şekil 19. İnce film gelişim modelleri: **a)** Frank Van Der Merwe **b)** Stranski – Krastanov **c)** Volmer Weber

Birikme esnasında ara yüzey serbest enerjisi ve film yüzeyindeki serbest enerjisi etkili olmaktadır. Yüzey hareketliliğinin yeterli olduğu durumlarda yüzeydeki atomlar yüzey serbest enerjisini düşürmek için yeniden düzenlenebilirler. Bu durumda iki büyüme mekanizması geçerlidir: (a) ve (c).

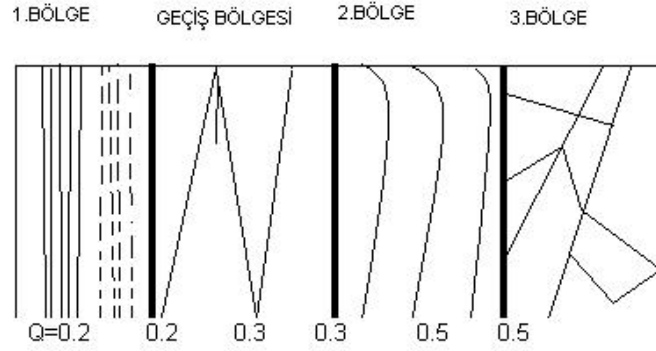
Eğer taban malzemesi ile buharlaştırılarak oluşturulan malzeme arasında güçlü bir bağ varsa, film tabaka (Frank Van Der Merwe) gelişecektir. Şayet film ile taban malzemesi arasında güçlü bir bağ yoksa tabaka büyüme, toplam yüzey enerjisini artıracaktır. Bu durumda büyüme üç boyutlu adacıklar modeline göre gelişecektir.

Üç büyüme modeli olan Stranski – Krastanov modelinde ise büyüme önce tabaka halinde, daha sonra enerji durumu değişerek üç boyutlu adacıklar formunda gelişir (Demir, 2007).

1.5. İnce Filmlerde Yapısal Bölge Modeli ve Foto-uyarmalı Süreç

Isıl buharlaştırma yöntemi ile uygulanan metal film kaplamalarında tane boyutunun, altlık sıcaklığı azaldıkça küçüldüğü bilinmektedir. Düşük altlık sıcaklıklarında altlığa yapışan atomların hareketliliklerinin ve difüzyon hızlarının oldukça az olması nedeniyle küçük boyutlu taneler oluşmaktadır. Ayrıca ısıl buharlaştırma yöntemi ile sıvı azot sıcaklığına yakın veya daha düşük altlık sıcaklıklarında hazırlanan farklı metal ince filmlerin tane boyutu yaklaşık 10 nm veya daha altında olabilmektedir (Yoshida vd., 1972)

Vakum buharlaştırma yönteminde filmlerin oluşum mekanizması yapısal bölge modeliyle açıklanır. Yapısal bölge modeli, buhar ortamından gelen parçacıkların altlık sıcaklığına bağlı olarak yüzey veya hacim difüzyonuna dayanmaktadır. Bu bölgeleri birbirinden farklı kılan altlık sıcaklıkları farkıdır. Aşağıda yapısal bölge modeli gösterilmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. Yapısal bölge modeli

Birinci bölge;

Genelde bu bölgede çalışılır.

1. Bu bölgede taneler(hücreler) konik, sütunsal biçimdedir.
2. Sütun sınırları çok belirgin değildir.
3. Altlığa gelen atomların yüzeysel ve hacimsel difüzyonu bu belirsizlikten dolayı büyük değildir. Bu durum film kalınlığı arttıkça gölgeleme etkisinin artmasına neden olur.
4. Gölgeleme etkisi, bir üst katmanın bir alt katmanın büyümesini engellemesidir. Bu olumsuz süreç, büyüyen filmin pürüzlü ve kusurlu olmasına neden olur.
5. Birinci bölgenin oluşumu için şu orantı geçerli olmalıdır:

$$Q = T_s / T_m < 0,2 \quad (13)$$

T_s altlık sıcaklığı ve T_m buharlaştırılan malzemenin erime sıcaklığı olmak üzere $T_s / T_m > 1$ durumu altlık sıcaklığının çok yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda altlıkta buharlaşma başlar.

Geçiş bölgesi;

1. Birinci bölge ile 2. bölge arasında bir geçiş bölgesi olması gerekir.
2. Kısmen life benzer tane yapısı vardır.
3. Birinci bölgeye göre hacimsel ve yüzeysel difüzyon daha büyüktür. Gölgeleme etkisi küçüktür.
4. Film daha homojen ve kusur yoğunluğu daha düşüktür.
5. $0,2 < Q < 0,3$ olmalıdır.

İkinci bölge;

1. Bu bölgede tabakaların oluşumunu yüzeysel difüzyon belirler.
2. Ayrıca bu bölgede atomların hareketliliği çok büyüktür. Gölgeleme etkisi çok azdır.
3. Atomların altlık yüzeyinde büyük hareketliliğinden dolayı atomlar yüzeyde daha düzgün dağılır.
4. Taneler sütunsal biçimdedir ve sütun sınırları belirlidir.
5. Film yüzeyi düzgün ve mattır.
6. $0,3 < Q < 0,5$ olmalıdır.

Üçüncü bölge;

1. Bu bölgede hacimsel difüzyon baskındır.
2. Avantaj: Yeniden kristalleşme meydana gelebilir.
3. Taneler oldukça büyüktür.
4. Tane sınırları altlık yüzeyine göre rastgele yönelimlidir.
5. Yüzey çok düzgün ve parlaktır.
6. $0,5 < Q$ olmalıdır.

Yapılan çalışmalarda hazırlanan bazı ince film örneklerinin yapısal bölge modeline göre beklenenden daha yüksek kaliteye sahip olması bu difüzyon süreçlerinin film oluşumunu açıklamada tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu konudaki alternatif oluşum süreci soliton modeli ile açıklanmış ve bu modelde sadece kritik boyutlu parçacıkların soliton hareketliliğine neden olduğu ortaya konulmuştur (Kukushkin ve

Osipov,1995). Bu durum ise kaplanan filmin homojen bir tane boyutu dağılımına ve yüksek yapısal kaliteye sahip olmasını sağlamaktadır (Tomakin vd., 2011a ; Tomakin vd., 2011b ; Buldu, 2019). Burada soliton dalganın oluşumu daha fazla kümeyi kendine çekmesine olanak sağlar.

Doğrusal olmayan özellikteki soliton dalgaları kütle taşıyabilmeleri sebebi ile parçacıkların altlık yüzeyinde herhangi bir enerji kaybı olmadan hareketini sağlamaktadır. Bu modelde altlığın kristal yapıda olması tek yönde burger vektörünün meydana gelmesine ve böylece soliton dalgası ile parçacıkların taşınımının aynı yönde olmasına sebep olur. Buda homojen bir kaplama olmasını sağlamaktadır. Birçok yönde burger vektörü oluşması nedeniyle amorf altlıklarda soliton dalgasının etkisi ile parçacık hareketi farklı yönlerde meydana gelir ve yüzey homejenliği bozulur (Lee, 1999).

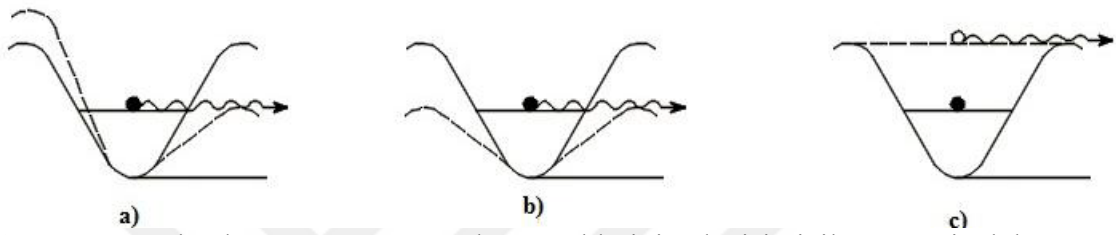
Isıl buharlaştırma yönteminde film oluşum süreci aynı zamanda buhar oluşturulan ortamda bağlıdır. Eğer kaplama işlemi vakum ortamı içinde kısmen kapalı hacimde doymuş buhar ortamında yapılırsa altlık yüzeyinde kontrol edilebilir boyuta sahip çekirdeklenme süreci meydana gelir.

Yarıiletkenlerde difüzyon işlemi için iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler, ısısal ve ısısal olmayan yöntemlerdir. Yüksek buhar basıncı içeren (kükürt, telluryum, selenyum gibi) yarıiletken yapılarda difüzyon işlemlerinde çoğunlukla ısısal olmayan fotouyarmalı süreçler kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin ışınlandırılması sürecinde, yapıda yoğunluk gradyandı oluşması iç elektriksel alan meydana gelmesine neden olmaktadır. Işınlandırma sonucu kristal kafeste oluşan kusurlar ve yapıdaki atomların yer değiştirmesi 4 farklı mekanizma ile açıklanmaktadır. Bu mekanizmalar;

1. Elektrik alan altında iyonların hareketliliği
2. Atomların yüklerindeki işaret değişimi
3. Atomlarda titreşim hareketlerin oluşumu
4. Foton ve fonon etkileşmesi

olarak ifade edilmektedir.

Işınlanmanın etkisi ile difüzyon sonucu yük taşıyıcılarının homojen dağılmaması ile yarıiletkenlerde iç elektriksel alan meydana gelmektedir. İç elektriksel alan kristal kafeste potansiyel kuyuların boyutlarını küçültmektedir. Ayrıca bu küçülmenin yönü elektriksel alan yönündedir. Bu fiziksel olay ile birlikte alan doğrultusunda iyonların geçidi daha kolay gerçekleşmektedir. Örneğin iç elektriksel alan $E=10^6$ V/cm ise, potansiyel kuyu yüksekliğindeki azalma 0,1 eV olmaktadır. Atomların yük işaretindeki değişimler, atomların kristal kafesteki durumlarını da etkilemektedir.



Şekil 21. Işınlandırma sonucu atomların yüklerinin değişimi ile potansiyel kuyunun görüntüsü

Şekil 21’de ışınlandırma sonucu atomların yüklerindeki işaret değişimi ve bunun sonucu olarak potansiyel kuyusundaki değişim verilmiştir. Kesikli çizgiler ışınlandırma sonrası potansiyel kuyunun görüntüsüdür. Şekil 21.a’da iyonların hareket mekanizması, 21.b’de yük değişimi mekanizması, 21.c’de ise titreşim mekanizması gösterilmektedir. Görüldüğü gibi tüm mekanizmalarda potansiyel kuyunun değişimi iyonların geçidine kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca bu kolaylığın yönü elektriksel alan yönündedir. Üçüncü mekanizmanın diğer mekanizmalardan farkı bu geçit esnasında rekombinasyona uğrayan parçacıkların foton üretmemesidir.

Dördüncü mekanizmada ise atomların titreşiminden (uyarılmış atomların) fotouyarmalı hareketlilik meydana gelmektedir. Yani foton enerjisi fonon enerjisine dönüşmektedir (Caferov, 1984).

Foto-uyarmalı difüzyon yönteminde yarıiletkende gerçekleşen difüzyon süreci, termo difüzyon sürecinden farklı olarak yarıiletkenin sıcaklığına hiçbir müdahalede bulunmadan gerçekleşmektedir. Böylece temel malzemenin yapısal özelliğini bozmadan yabancı atomlarla katkılanması gerçekleştirilebilmektedir. Yarıiletken yüzeyi ışınlarla ışınlandırıldığında yarıiletkenin hacimsel bölgesinde bir elektriksel alan meydana gelir.

Bu elektriksel alan sayesinde yabancı atomların kristal hacimle hareketliliği sağlanmaktadır. Ayrıca, ışınlandırılmış yüzeyle (fotonların girme derinliğine bağlı olarak) kristal hacimde oluşan yoğunluk farkı (grandyantı) ile oluşan elektriksel alanın ayarlanabilmesi mümkündür. Ne kadar fazla ışınlandırılma yapılırsa o kadar fazla elektriksel potansiyel meydana gelmektedir.

Işınlanmanın etkisi ile yarı-iletken malzemelerde iç elektriksel alan oluşmaktadır. Bu alanın oluşumu serbest yük taşıyıcıların hareketine neden olmaktadır. Bu hareketlilik sayesinde kristal hacminde difüzyon gerçekleşmekte ve düzensiz dağılımlar meydana gelmektedir. Bununla birlikte ışınlanmanın etkisi ile kristal kafesin potansiyel değeri değişmektedir. Kristal kafeste bu değişiklik elektriksel alan yönünde bariyer poansiyelini de düşürmektedir. Gerçekleşen bu süreçte iyonların elektriksel alan doğrultusunda hareket olasılığı yükselmektedir. Çalışmalarda etkili bir iç elektriksel alanın $E= 10^4 - 10^7$ V/cm değerinde olduğu rapor edilmektedir. Eğer oluşan elektriksel alan $E=10^6$ V/cm ise bariyer potansiyelindeki küçülme yaklaşık 10^{-1} ev olmaktadır. ($\Delta E= 10^{-1}$ eV)

Fotouyarmalı difüzyon sürecinde kullanılan ışının foton enerjisi uygulanan yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya büyük olursa yarıiletkenin hacimsel bölgesinde iç elektriksel alan oluşur ($hV \geq E_g$). Bunun bir diğer nedeni fotonların kristalin farklı kalınlıklarında farklı değerlerde soğurmasıdır. Kalınlık arttıkça soğurma değeri düşmektedir. Oluşan bu iç elektriksel alan kristalde elektronları ve boşlukları hareket ettirerek bir akım oluşturmaktadır. Aşağıdaki denklemlerde elektronların ve boşlukların akım bileşenleri ifade edilmektedir.

$$J_n = -\mu_n kT \frac{\partial n}{\partial x} + e\mu_n nE \quad (14)$$

$$J_p = -\mu_p kT \frac{\partial p}{\partial x} + e\mu_p pE \quad (15)$$

Burada μ_n ve μ_p elektronların ve boşlukların mobilitesidir. N ve p elektron ve boşlukların yoğunluğudur. E ise iç elektriksel alandır. Bir kristalde bir termodinamik

denge durumundan elektronlardan ve boşluklardan kaynaklanan akımdırlar sabittir. Bu durumda yapı içerisindeki alan şu şekildedir.

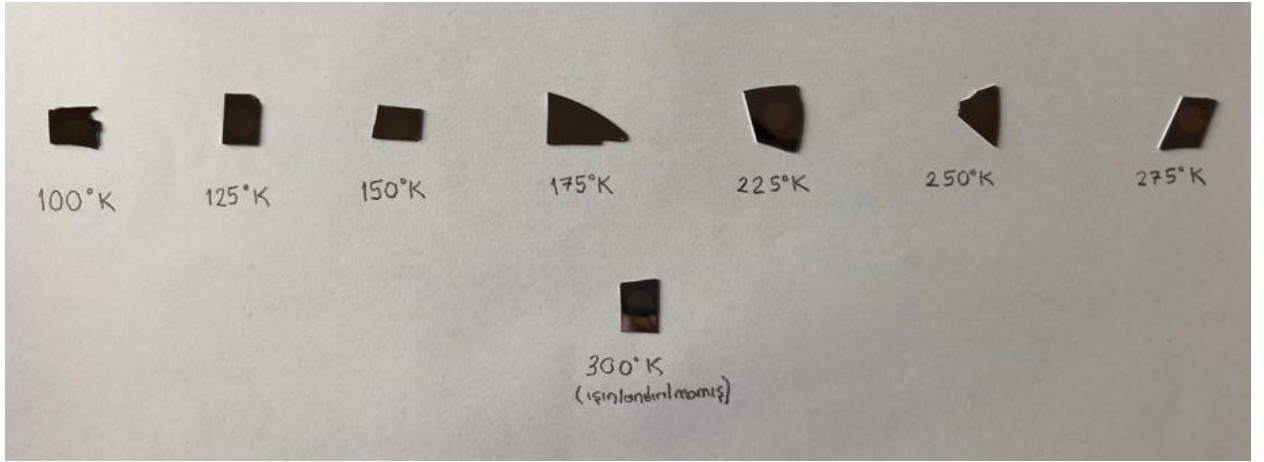
$$E = \frac{kT(\mu_n \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_p \frac{\partial p}{\partial x})}{\sigma_n - \sigma_p} \quad (16)$$

σ_n ve σ_p elektronların ve boşlukların iletkenliğidir. Fotouyarmalı difüzyon süreci hacimsel ve yüzeysel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Genelde ince film incelemelerinde yüzeysel fotouyarmalı difüzyon mekanizması öne çıkmaktadır (Dhjaferov, 1987 ; Caferov, 1984).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Altlıkların Hazırlanması

Diyot yapımında daha iyi bir sonuç elde edebilmek için örneğin yüzey kirlerinden arındırılması gerekir. Bu çalışmada (100) yönelimine, 1-10 $\Omega\text{-cm}$ öz direncine ve $\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluğuna sahip n-tipi Si altlıklar kullanıldı (Şekil 22). Altlıklar alkol ile temizlenerek üzerindeki istenmeyen maddelerden arındırıldı.

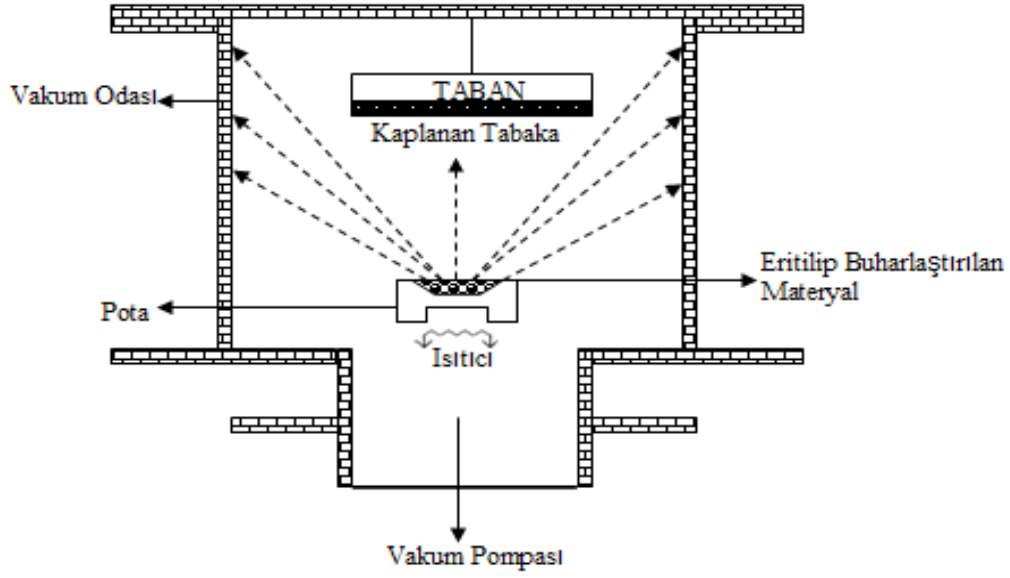


Şekil 22. Üretimi yapılan Ag/n-Si örnekleri

2.2. Soğuk Altlık Yöntemi

Kullanılan bu sistemde, vakum ortamında malzemenin buharlaşması sonucu buhar fazı oluşturulur. Kapalı hacimde oluşturulan doymuş buhar ortamında farklı boyutlarda kümeleşmeler olur. Bunlardan en kararlı olanı kritik boyuta sahip olanlardır. Ortamın basıncına göre kritik boyut oluşmaktadır.

Archibald ve Parent (1976), termal buharlaştırma yöntemi için var olan buharlaştırıcıların kaplama işlemindeki avantajlarını, karakteristik özelliklerini ve sınırlıklarını ele alıp tartışmışlardır.



Şekil 23. Termal buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

Bu tez kapsamında ilk defa Ag/n-Si ikili yapı Schoyttky bariyerleri düşük altlık sıcaklarında (100 - 300 K) 10^{-5} Torr ve kısmen kapalı vakum ortamında buharlaştırılarak elde edildi.

Düşük vakum ortamında (10^{-5} - 10^{-6} Torr) soğuk altlık yöntemi ile buharlaştırma düzeneğinde altlık soğutma sistemi ve doymuş buharı içeren reaktör olmak üzere iki temel parça bulunmaktadır. Altlık soğutma sisteminde sıvı azot, reaktörde ise buharlaştırılacak malzemenin doymuş buharı bulunmaktadır. Söz konusu sistemde, altlığı soğutmak için sıvı azotun dolaşacağı bakır borudan oluşan bölüm, altlığın, altlık tutucularının ve ayarlanabilir (açılıp kapanabilir) pencerenin bulunduğu bölüm, silindirik kuartz reaktör, buharlaştırılacak malzemeyi ve malzemeyi buharlaştırmak için kullanılan ısıtıcı yer almaktadır. Kapaklar manuel olarak hareket ettirilerek, pencere açılıp-kapatılabilir. Böylece malzeme buharlaşırken süreye bağlı olarak film büyümesi gerçekleştirilebilir. Vakum ortamında hazırlanan filmlerin büyüme hızı, vakum şartlarına bağlıdır. Orta ve düşük vakumda, kaynaktan kopan atom ve moleküller, ortamdaki hava molekülleri ile sık sık çarpışırlar. Bunun sonucu olarak film büyüme hızı azalır.

Sıvı azotla soğutulmuş altlıkların doymuş buharla teması reaktörde tasarlanan açılıp kapanabilir pencere yardımıyla sağlanmaktadır. Sıvı azot ile soğutulan altlıklar reaktördeki doymuş buhar ile temas ettiğinde altlık yüzeyine doymuş buhar ortamından

farklı boyutlarda nano ölçekli kümeler taşınır. Bu kümeler kritik öncesi, kritik ve kritik ötesi boyutlar olarak sınıflandırılır. Kritik boyutlu kümeler; doymuş gaz ortamında bulunan atomların basıncı doymuş buhar basıncından biraz yüksektir ve bu nedenle bu atomlar serbestçe hareket edebilir. Buhar ortamında oluşan kümeler bu atomların yapışmasıyla büyümektedir. Bu süreçte gaz ortamında oluşan kümeler genellikle eşit boyutludur. Kritik öncesi boyutlu kümeler, ortamda bulunan atomların hepsi çok yüksek basınçları nedeniyle buhar ortamında oluşan kümelere yapışmış durumdadır ve ortamda serbest atom yoktur. Ortamdaki kümeler birbiri ile çarpışarak büyümektedir. Kritik ötesi boyutlu kümeler ise kritik ve kritik öncesi boyutlu kümelerin gerçekleşmediği durumlarda geçerlidir. Küme büyümesi küçük kümelerin atomlarının buharlaşarak büyük kümelere yapışmasıyla gerçekleşir (Belyaev ve Rubets, 2001; Belyaev vd., 2003).

Bu yöntemin en büyük avantajı ve diğer yöntemlerden farkı; doymuş buhardan gelen altlık yüzeyine taşınan ve buraya konumlanan kümelerin altlık atomlarıyla çarpışması esnasında soliton dalgası oluşturmasıdır. Doğrusal olmayan özelliğe sahip soliton dalgaları kütle taşıma özelliği nedeniyle altlık yüzeyinde parçacıkların enerji kaybına uğramadan hareket etmesini sağlamaktadır. Bu modelde altlığın kristal yapıya sahip olması, tek yönde Burger vektörünün oluşmasına ve böylece soliton dalgası etkisiyle parçacıkların taşınımının aynı yönde gerçekleşmesine neden olur. Bu durum homojen bir kaplama sağlamaktadır (Bacaksiz, 2007 ; Tomakin vd., 2011a; Buldu, 2019)

Belyaev ve ark. tarafından hem metal hem de yarıiletken malzemelerin klasik ısı buharlaştırma yöntemi (kısmen kapalı hacim olamayan yöntem) ile soğuk altlıklar üzerinde kaplanmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır (Belyaev ve Rubets, 2001; Belyaev vd., 2003). Belyaev ve ark. Film oluşum sürecini Soliton modeli ile açıklamış ve bu modelde sadece aşağıdaki (denklem 17) ampirik denklemi sağlayan kritik boyutlu parçacıkların Soliton hareketliliğine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Soliton dalgasının oluşumu ile soliton büyüme mekanizmasını gerçekleştiren kümelere kritik boyutlu kümeler denir. Kritik boyutlu kümeler altlık yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak 10-15 nanometre arasında değişmektedir.

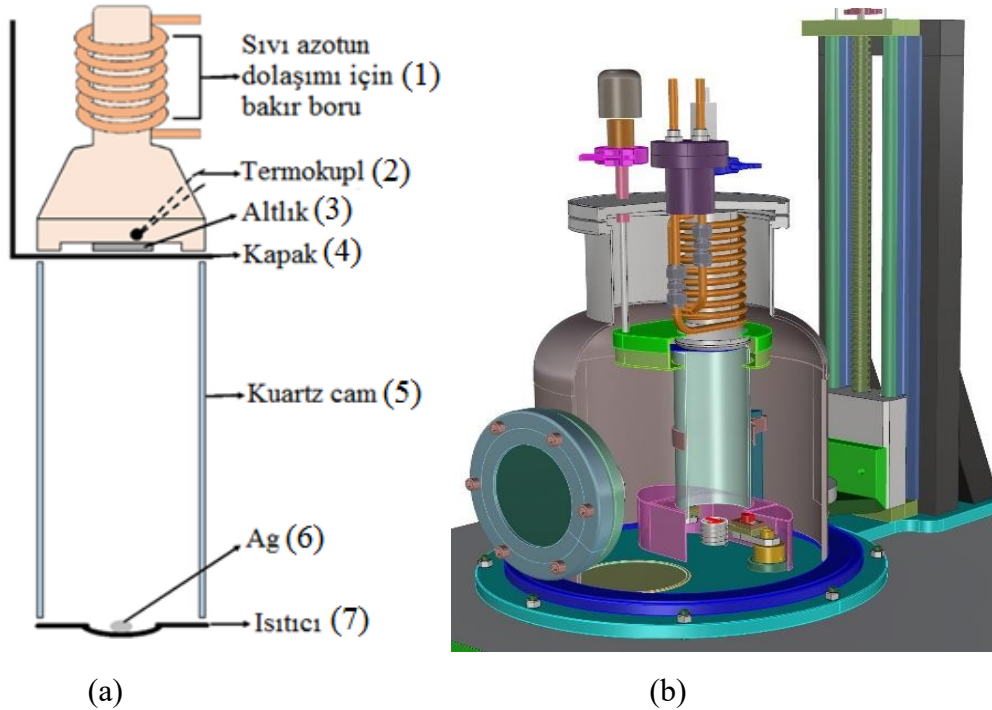
Altlık yüzeyinde kritik boyutlu kümelerin soliton dalgasını oluşturması için aşağıda verilen eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{a(T_r) - b(T_s)}{b(T_s)} > \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{f}{\lambda}} \cdot a(T_r) \quad (17)$$

Burada; T_r altlık yüzeyindeki kümenin sıcaklığını, T_s altlığın sıcaklığını, f altlıkla küme (doymuş buhardan gelen tüm kümeler) arasındaki etkileşme kuvvetini, λ altlık atomları arasındaki etkileşme kuvvetini göstermektedir. a ve b değerleri ise malzemenin doğal yapısına bağlı olarak değişen katsayılardır.

Altlık yüzeyinde soliton dalgası oluşturamayan kritik öncesi ve kritik ötesi kümeler ise tekrar doymuş buhar ortamına dönüş yaparlar. Böylece altlık yüzeyi eşit boyutlu nano ölçekli kümelerle kaplanarak metalik film katmanları oluşturulmuş olur.

Kısmen kapalı hacimde ısı buharlaştırma yöntemi ile soğutulmuş altlıklar üzerinde metal kaplamaları ile ilgili çalışmalara rastlanmasa da bu yöntemle soğuk altlıklar üzerinde yarıiletkenlerin kaplanması ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır (Bacaksiz vd., 2007; Novruzov vd., 2010; Tomakin vd., 2012).



Şekil 24. a) Soğuk altlık üzerinde ince film hazırlamak için kullanılan deneysel düzeneğin şematik gösterimi. b) Tez kapsamında kullanılan vakum sistemi ve soğuk altlık aparatının şematik gösterimi.

2.3. Ag/n-Si Örneklerinin Hazırlanması

Bu aşamada sabit kaynak-altlık mesafesinde ve değişik altlık sıcaklıklarında (300 - 100 K, $\pm 2,5$) Ag/n-Si metal yarıiletken ikili yapıları hazırlandı.

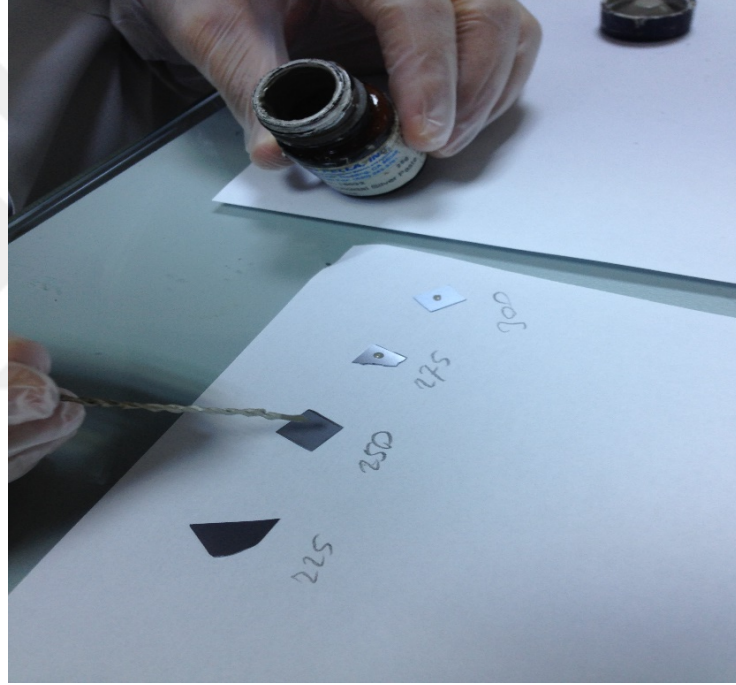
Bu çalışma için R.T.E.Ü. Mühendislik fakültesinde İnce Film Üretim Laboratuvarında bulunan VAKSİS PVD Handy/1DLE-LN marka cihazla buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 25. VAKSİS PVD handy/1DLE-LN marka termal buharlaştırma sistemi

İlk önce cihaz içerisindeki parçalar ve buharlaştırma işlemi gerçekleştireceğimiz numuneler steril hale getirildi. Alkol ile temizlenen Ag tel (0,06 g) ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Si, delik çapları 6 mm olan maskenin üzerine parlak tarafı üstte olacak şekilde altlık tutucu üzerine yerleştirildi ve daha önce çalıştırılıp vakum için hazır hale getirilen vakum cihazının içerisine yerleştirildi. Vakum işlemi esnasında basınç değerinin $\sim 1 \times 10^{-5}$ Torr değerine düşene kadar beklenildi ve daha sonra sıcaklığı istenilen seviyeye

düşürmek için azot eklemesi yapıldı. İstenilen sıcaklığa ulaşıldığında daha önceden temizlenip kayıkçık üzerine konulan Ag teli buharlaştırıldı. Kayıkçık yavaş yavaş ısıtılarak gümüş telinin erimesi sağlandı ve numune önündeki pencerenin açılması ile gümüşün ~6-7 dk süre ile altlıklara kaplanması sağlandı. Buharlaştırma işleminde, tüm örnekler için kayıkçığa aynı güç değeri uygulandı. Daha sonra pencere kapatıldı ve sıcaklığın oda sıcaklığına ulaşması beklenildi. Buharlaştırma işleminin ardından yeteri kadar bir süre bekledikten sonra numuneyi vakum cihazından çıkardık. Bu sayede Schottky kontak elde edilmiş oldu. Omik kontak almak için Si malzemenin mat kısmına gümüş pasta sürüldü ve böylece omik kontaktağı elde etmiş olduk.

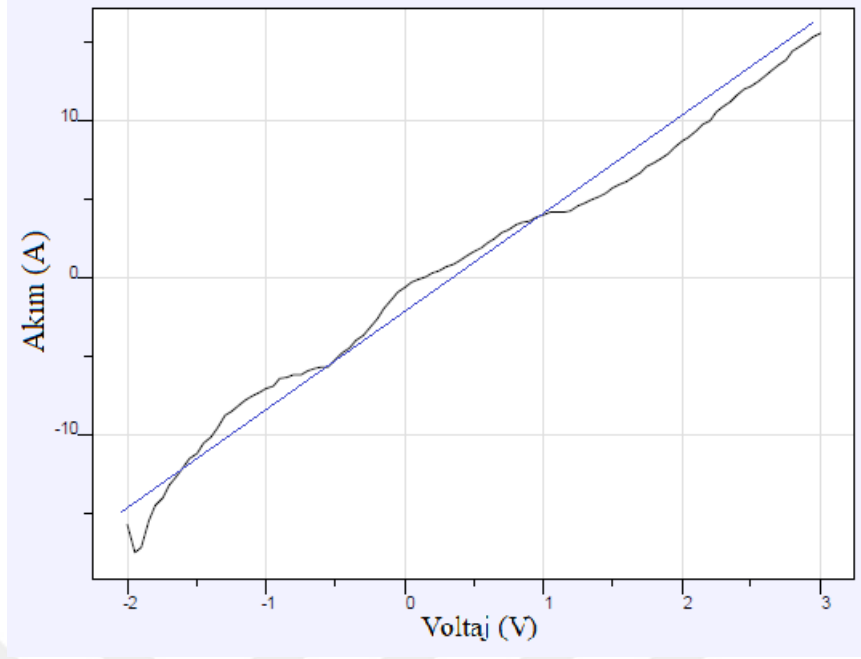


Şekil 26. Örneklere gümüş pasta sürülmesi



Şekil 27. Oluşturulan Schottky diyotun şematik görünümü

Oluşturulan gümüş kontaktağı omik özellik gösterdiği ölçüm yapılarak tespit edildi ve Şekil 28’de verildi.



Şekil 28. Oluşturulan omik kantağın I – V grafiği

2.4. Hazırlanan Örneklerin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

2.4.1. X-ışını Kırınım Cihazı (XRD) Ölçümleri

X-ışını kırınımı; kristal yapıların analizinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle, bir malzemenin kristal yapısı incelenebilmektedir. İngiliz fizikçi W.H. Bragg tarafından 1913 yılında ortaya atılan teoreme göre, malzemeye gönderilen x-ışını, yapıdaki atomlara çarparak kırınıma uğramaktadır. Malzemeye gelen bir dalga, kristal düzlemleri üzerindeki atomlar tarafından saçılmaktadır. Buna göre, paralel örgü düzlemlerinin arasındaki uzaklık d , gelen ve yansıyan ışının düzlemlerle yaptığı açı θ ise, komşu iki düzlemden saçılan ışınlar arasındaki yol farkı $2d \sin\theta$ olur. Yapıcı bir girişim olabilmesi için, bu ardışık iki düzlem arasından saçılan ışınların arasındaki yol farkının, dalga boyunun (λ) tam katı olması gerekmektedir. Böylece Bragg Yasası:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (18)$$

şeklinde yazılmaktadır.

Bu tez çalışmasında elde edilen örneklerin kristal yapılarının ve fazlarının belirlenmesi için kırınım desenlerinden faydalanılmıştır. Bu çalışma için R.T.E.Ü. Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan şekildeki Rigaku-SmartLab marka XRD cihazı kullanılmıştır. Ölçümler $20^\circ < 2\theta < 80^\circ$ aralığında dakikada 3° tarama hızı ile oda sıcaklığında ölçümler gerçekleştirilmiştir.



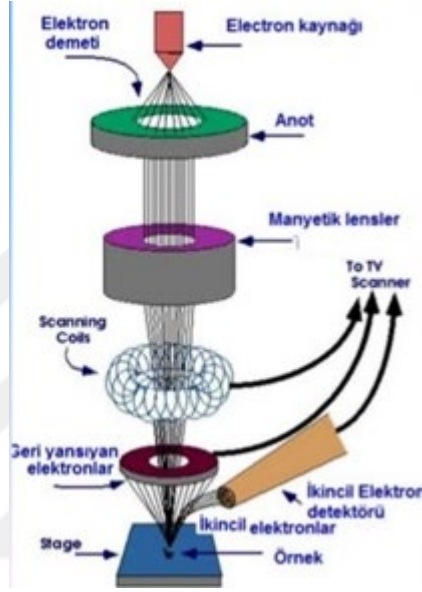
Şekil 29. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi

2.4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ölçümleri

Taramalı Elektron Mikroskobu yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromagnetik lenslerle inceltiren elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz eder. Mikroskopta oluşan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışınlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak meydana getirilir.

Elektron demeti yüzeye çarparak, yüzeyden bir elektron veya foton yayınlamasına sebep olur. Genellikle görüntüler, yüzeyden yayınlanan geri saçılmış elektronları veya ikincil elektronları kullanarak oluşturulur. SEM görüntüleri, yüzey yapısı ve topografisi yani sıra tane boyutu, tane şekli gibi kristalografik bilgiler sağlar (Pingsuthiwong, 2004).

Taramalı elektron mikroskobu üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemidir. Optik kolon bölümünde, elektron tabancası ile meydana getirilen elektron demetini kaynağa odaklamak için objektif merceği ve elektron demetini hızlandırmak için verilen yüksek gerilim kaynağı anot levhası, yüzeyin tarama işleminin yapılması için tarama bobinleri, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler bulunmaktadır.



Şekil 30. SEM cihazı ve şematik gösterimi

Bu çalışmada R.T.E.Ü. Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan şekilde gösterilen JEOL marka JSM 6610 marka elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 30).



Şekil 31. JEOL marka JSM-6610 model taramalı elektron mikroskobu

Kristal yapıda kimyasal bileşim oranları SEM cihazında bulunan Instruments Inca X-act marka enerji ayıtmalı spektrometre (EDS) cihazı ile alan taraması yapılarak elde edilmiştir.

2.4.3. UV Cihazı

Bu teknolojik süreçte elde edilen Ag/n-Si ikili yapılarda p-n geçit gerçekleşmesinde UV ışınları kullanıldı ve gümüş iyonlarının Si katmanına hareketliliği foto uyarmalı difüzyon süreci ile gerçekleştirildi. Bu çalışmada R.T.E.Ü Mühendislik Fakültesi İnce film Laboratuvarında bulunan şekilde gösterilen CAMAG marka ve 354 nm dalga boyu ışın kullanılmıştır (Şekil 32).



Şekil 32. CAMAG marka ultraviyole cihazı

2.4.4. Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi

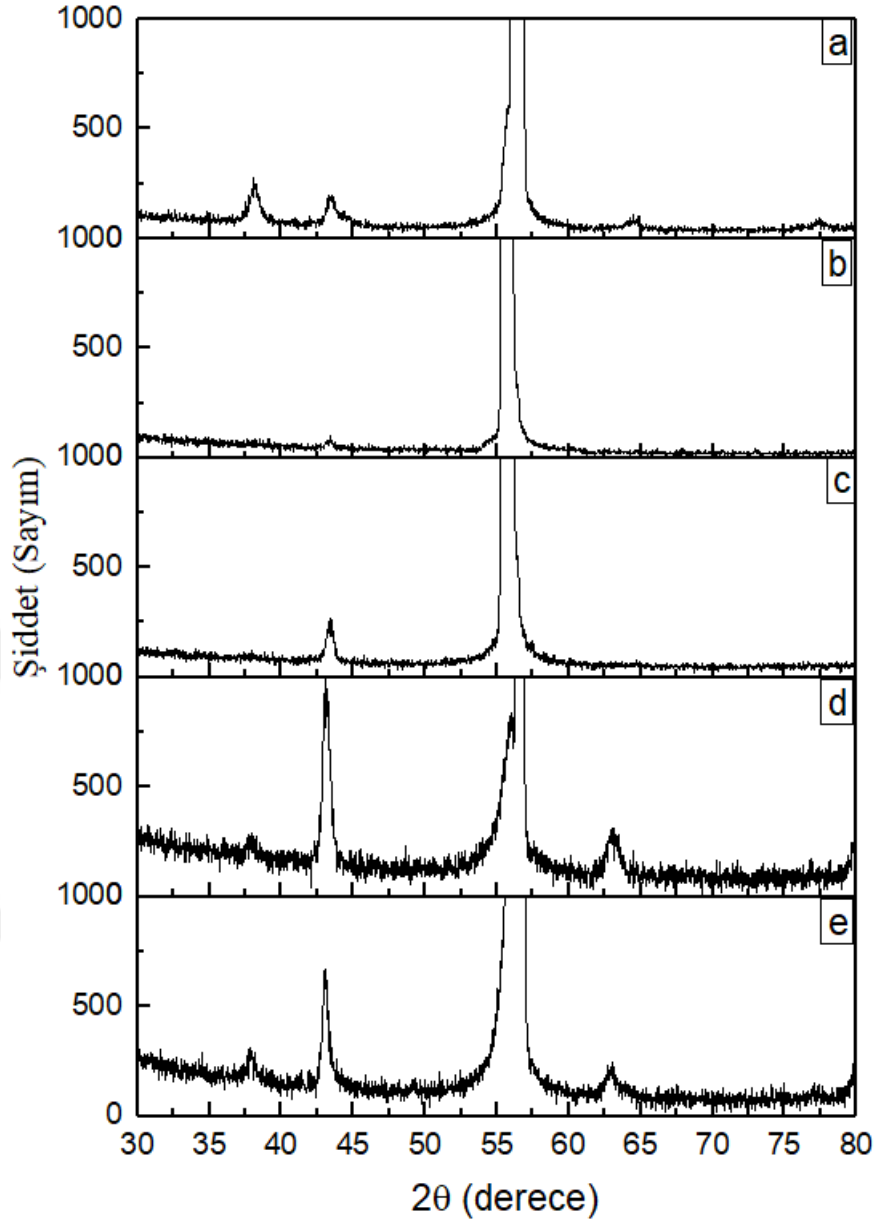
Oluşturulan Ag/n-Si (MS) diyotların I-V ölçümleri Keithley 2410 cihazı ile karanlık ortamda ve oda sıcaklığında yapıldı. Akım gerilim ($I-V$) ölçümlerinden alınan verilerden, engel yüksekliği, idealite faktörü parametreleri Termoiyonik emisyon kuramından yararlanılarak bulundu.

3. BULGULAR

3.1. Ag Kaplanan n-Si Örneklerin XRD Analiz Sonuçları

n-Si altlıklar üzerinde hazırlanan gümüş ince filmlerinin XRD desenleri Şekil 33'de verildi. XRD analizlerinden Si ve Ag pikleri gözlemlendi. Bu desende görülen tüm kırınım pikleri PDF Card No: 1100136 veri kartı ile karşılaştırıldı. Elde edilen piklerin kübik Ag yapısına (PDF Card No: 1100136) ait olduğu belirlendi. Bununla birlikte yaklaşık 56° 'de Si altlığına ait pik tespit edildi.

300 K'de hazırlanan gümüş ince filmde en şiddetli pik (111) olduğu bunun yanında düşük şiddetli (200) ve (220) piklerinin de oluştuğu belirlendi. Altlık sıcaklığı azaldıkça pik şiddeti azaldı ve (111), (220) pikleri kayboldu. 200 K altlık sıcaklığından sonra pik şiddeti tekrar arttı ve tercihli yönelim (111)'den (200)'a değişti (Bacaksiz vd., 2009; Bacaksiz vd., 2007 ; Balyaev vd., 2003 ; Tomakin vd., 2011a).



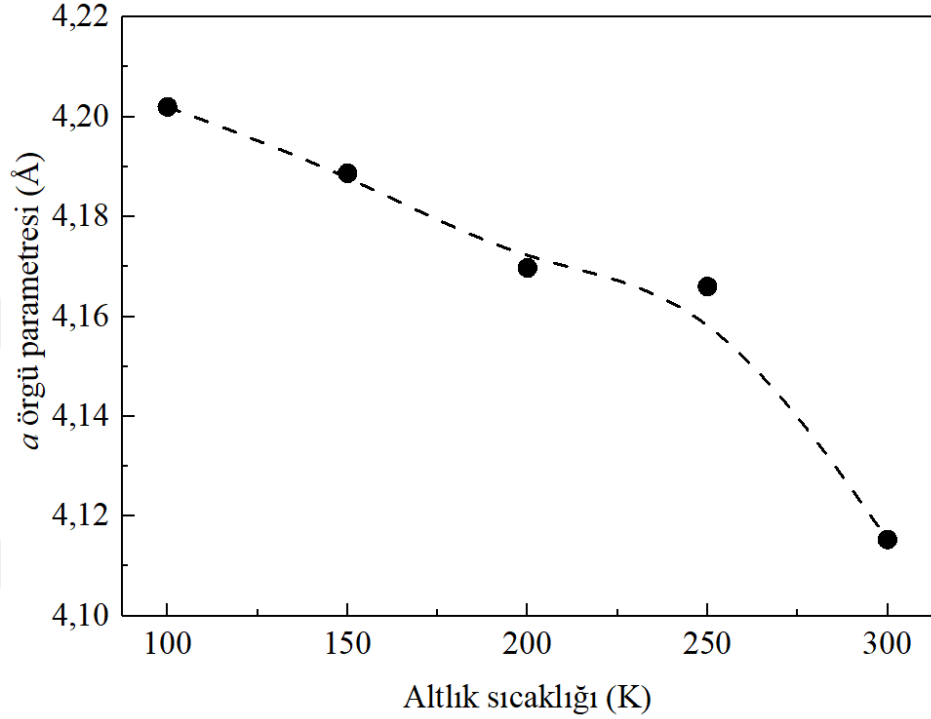
Şekil 33. 200 K ve 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Ag/n-Si örneklerin XRD ölçüm sonuçları; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K

Hazırlanan kübik kristal yapısına sahip Ag ince filmlerinin a örgü parametreleri aşağıdaki denklem (19) yardımı ile hesaplandı.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (19)$$

Burada d düzlemler arası mesafeyi, (h,k,l) Miller indislerini ve a örgü parametrelerini göstermektedir. Hesaplanan örgü parametresi değerinin 4,12 Å değerinden 4,20 Å

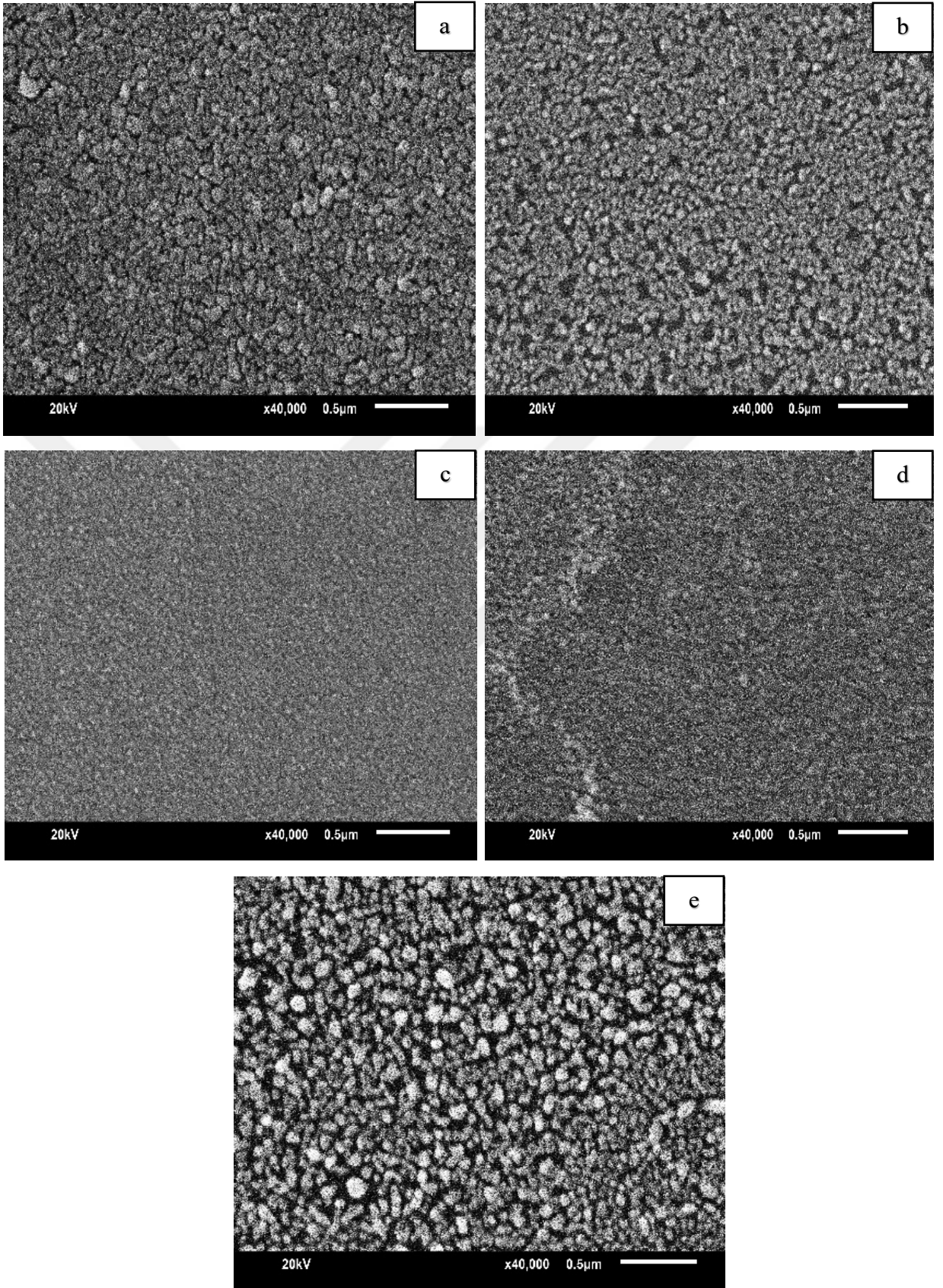
değerine arttığı gözlemlendi. Ag ince filmlerin örgü parametreleri incelendiğinde bulk (külçe) değerden (4,089 Å) fazla olduğu tespit edildi. Bu sonuç örneklerde sıkıştırma gerilmesi (compressive stress) oluştuğunu göstermektedir ve Ag ince film ($\alpha = 19 \times 10^{-6}$) ile Si altlık ($\alpha = 2,6 \times 10^{-6}$) arasındaki lineer termal genleşme katsayısındaki farktan kaynaklanabilir (Şekil 34).



Şekil 34. Ag/n-Si Schottky diyotların örgü parametreleri

3.2. Ag Kaplanan n-Si Örneklerin SEM Analiz Sonuçları

Elde edilen örneklerin yüzey özelliklerinin belirlenmesi için SEM ile görüntü alınmıştır. Şekil 35'den görüldüğü üzere altlık sıcaklığının gümüş tabakasının yüzey morfolojisini etkilediği açıkça görülmektedir. 300 K altlık sıcaklığındaki örneğin Ag tanecikleri ve tane sınırları belirgin şekilde gözlemlenebilmektedir. Fakat altlık sıcaklığı azaldıkça tane sınırları azaldığı ve daha sıkı bir yapı oluştuğu gözlemlendi.



Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda üretilen Ag/n-Si ikili yapıların SEM görüntüleri; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K

Şekil 35’den de görüldüğü üzere 300 K sıcaklığında altlık yüzeyi farklı boyutlu adacıklarla kaplanırken 200 K sıcaklığında altlık yüzeyi eşit boyutlu (10-15nm) Ag nano boyutlu taneler ile kaplanmıştır. Deneylerde soliton büyüme mekanizmasının 200 K altlık sıcaklığından sonra gerçekleştiği gözlemlendi. Şekil 35’den de görüldüğü üzere 300 K’de farklı parçacık boyutları varken 200 K de daha küçük, eşit boyutlu parçacıklar olduğu görülmektedir.

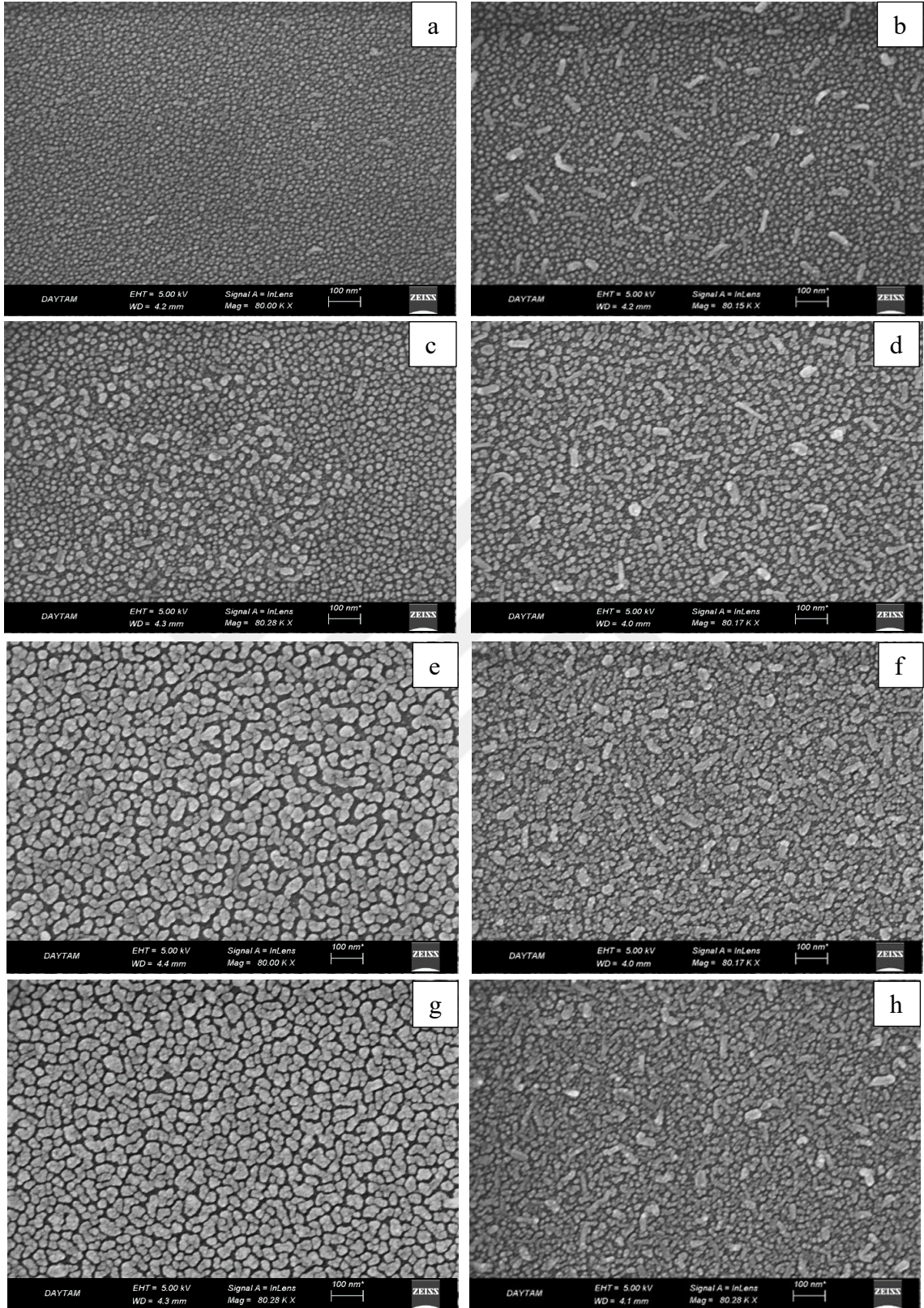
Ölçümlerimizi 100 K-300 K aralığında alarak soliton mekanizmasının hangi sıcaklıklarda etkili olduğunu belirledik. Şekil 35’den de görüldüğü gibi soliton büyüme mekanizmasının 200 K’den sonra başladığı ve 150 K altlık sıcaklığından sonra üretilen numunelerin SEM görüntülerine bakıldığında sıkı yapının bozulduğu ve tanecik sınırlarının belirginleştiği görülmektedir. Bu doğrultuda soliton büyüme mekanizması olarak çalışmada 200 K sıcaklığı baz alınmıştır.

Yoshida vd. (1972), çalışmasında 80 K sıcaklığındaki amorf karbon üzerine elektron kırınım metodu ile altın kaplama gerçekleştirdi. 100 – 300 K altlık sıcaklığındaki ölçümleri sonucunda düşük altlık sıcaklıklarında tane boyutlarının azaldığını tespit etti.

Bacaksız vd. (2009), ZnTe ince filmlerin -123 °C ve 27 °C altlık sıcaklıklarında üretilmesi üzerine çalışma yaptılar. Düşük altlık sıcaklığında üretilen numunenin tane boyutunun daha küçük olduğunu gözlemladiler.

Tomakin vd. (2011a), çalışmasında CdS ince filmleri 100 – 300 K altlık sıcaklığı aralığında üretti ve elde ettiği SEM görüntülerinden düşük altlık sıcaklıklarında üretilen numunelerin tane boyutunun daha küçük olduğunu ve yüzeyde daha homojen bir görüntü oluştuğunu gözlemladiler.

200 K ve 300 K altlık sıcaklıklarında soliton hareketlilik sürecinin takibi için farklı sürelerde cam altlık yüzeyine biriktirilmiş Ag katmanlarının yüzey morfolojileri incelendi. 4 farklı süre boyunca (5s, 10s, 15s, 20s) yüzey üzerine Ag kaplandı. Örneklerin Zeiss Sigma 300 marka FE-SEM cihazı ile elde edilen görüntüleri Şekil 36’te verildi.



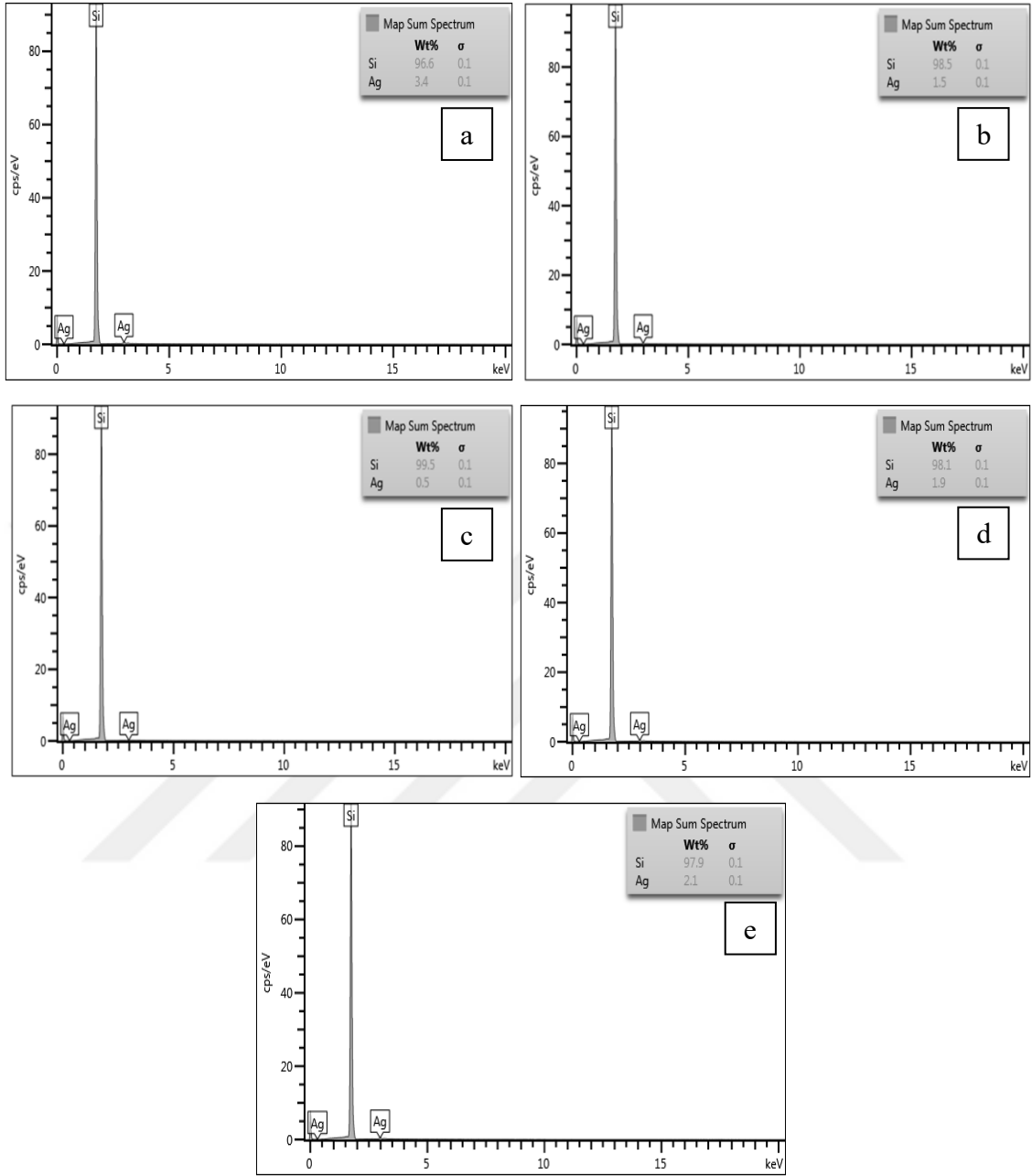
Şekil 36. 300 K ve 200 K altlık sıcaklığında cam üzerinde hazırlanan örneklerin 5s-20s aralığındaki FESEM görüntüleri: a) 300 K - 5 s., b) 200 K - 5s., c) 300 K - 10 s., d) 200 K - 10 s., e) 300 K - 15 s., f) 200 K - 15 s., g) 300 K - 20 s., h) 200 K - 20 s.

Klasik yöntemle yani termal buharlaştırma yöntemi ile hazırlanan filmlerin oluşumu daha çok altlık yüzeyindeki çok sayıda farklı boyutlu adacıkların büyüyerek kaynaşmasından elde edildiği görülmektedir. 200 K altlık sıcaklığına sahip cam zamanla eşit boyutlu tanelerle kaplanmaktadır. Yani film oluşumu altlık yüzeyinde biriken eşit boyutlu tanelerin yoğunluğundaki artışı ile gerçekleşmektedir. Böylelikle daha homojen bir yapı oluşmakta ve tek kristal özelliği taşıma ihtimali çok yüksek olmaktadır (Tomakin vd., 2011a).

3.3. Elde Edilen Örneklerin EDS Analizi Sonuçları

Ag kaplama yapılan Si örneklerinin EDS ölçüm sonuçları Şekil 37' de verildi. Şekil 37'den görüldüğü üzere altlık sıcaklığı 300 K'den 200 K'e doğru azaldıkça gümüş miktarı % 3,4' den % 0,5' e doğru azaldı. Altlık sıcaklığı 200 K'den 100 K'e doğru azalırken gümüş miktarı tekrar artarak % 2,3' e ulaştığı tespit edildi. Elde edilen bu sonuç SEM görüntülerinden de gözlenen soliton bölgesinin meydana geldiği sıcaklık aralığı ile uyumludur. SEM sonuçlarına göre soliton bölgesi 200 – 150 K arasında tespit edildi.

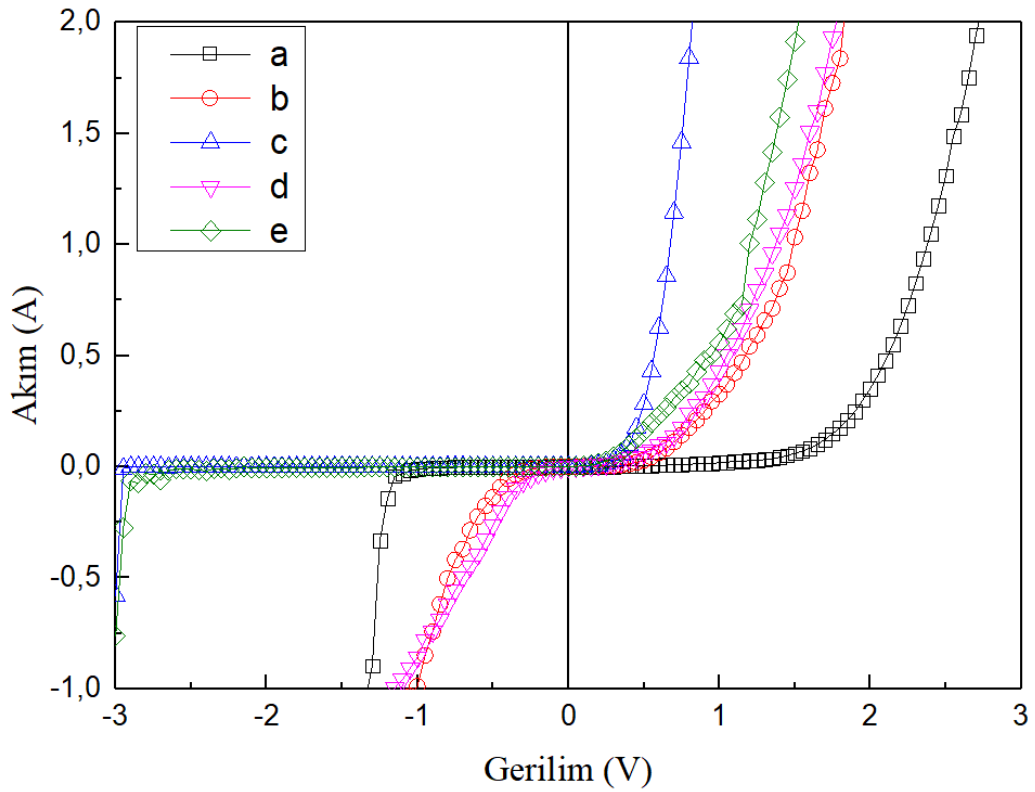
Buldu (2019) yapmış olduğu tez çalışmasında Ag ince filmlerini pürüzlendirilmiş titanyum alaşımı üzerinde farklı altlık sıcaklıklarında hazırladı ve EDS sonuçlarına göre gümüş miktarının altlık sıcaklığı azaldıkça arttığı ve 200 K altlık sıcaklığından sonra sabit kaldığını tespit etti. Bu sonuç bu tez çalışması ile uyuşmamaktadır. Bu farkın Ag katmanlarının farklı altlıklar üzerinde hazırlanmasından ve böylece soliton mekanizmasının farklı çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 37. Farklı altlık sıcaklığında hazırlanan Ag/n-Si yapısının EDS analizi; a) 300 k, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K

3.4. Akım-Gerilim Ölçümleri

Örneklerin Ag/n- Si Schottky diyotların akım voltaj ölçüm sonuçları şekil 38’de verildi. Şekil 38’e göre örneklerin hepsinin doğrultucu davranış sergilediği tespit edildi. Bununla birlikte altlık sıcaklığı azaldıkça doğrultucu davranışın iyileştiği, 150 K’den sonra tekrar doğrultucu davranışın bozulduğu görüldü. Bu sonuca göre soliton büyüme mekanizması ile hazırlanan Ag/n-Si yapılarının daha iyi doğrultucu davranış sergilediği söylenebilir.



Şekil 38. Farklı sıcaklıklarda hazırlanan Ag/n-Si Schottky diyotların I-V karakteristikleri; a) 300 K, b) 250 K, c) 200 K, d) 150 K, e) 100 K

İdeal bir diyotun idealite faktörü 1 olarak kabul edilir. $\ln I-V$ grafiklerinden yapılan hesaplamalarda idealite faktörünün 1’den büyük çıkması akım iletiminde termiyonik emisyonun modelinin aktif olduğunu gösterir. Schottky diyotlar için idealden sapmalar Schottky etkisi, yüzey homojensizlikleri, arayüzey durumları ve seri direnç etkisine atfedilebilir (Tung, 1992 ; Burgurcuoğlu, 2008). Metal-yarıiletken temasında, yarıiletken yüzey durumları var ise engel yüksekliğinin yüksek değerde olduğu bilinmektedir (Cowley and Sze, 1966 ; Rhoderick and Williams, 1988).

Diyodun idealite faktörünün hesaplanmasında deneysel I - V ölçümleri termiyonik emisyon kuramı yardımıyla analiz edilebilir. İdealite faktörü hesaplanırken,

$$I = I_o \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-eV}{nkT}\right)\right] \quad (20)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Doğru beslem durumunda $eV \gg 3kT$ olduğunda denklem (20)'deki '1' terimi ihmal edilebilir. Bu durumda denklem

$$I = I_o \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (21)$$

haline gelir. Denkeminin her iki tarafın \ln 'i alınıp V 'ye göre diferansiyeli alınarak düzenlenirse idealite faktörü;

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{\partial V}{\partial \ln I} \right) \quad (22)$$

olarak elde edilir. Ölçümden elde edilen I - V verilerinden, $\ln(I)$ - V grafiği çizilip bu grafiğin doğru beslem tarafına bir doğru çizilir ve bu doğrunun eğiminden $dV/d \ln I$ bulunur. Bulunan değerler ve diğer sabit terimler denklem (22)'de yerine yazılarak idealite faktörleri elde edilir.

Yine çizilen doğruların $V = 0$ 'da düşey ekseni kestiği nokta I_o doyma akımını verir. I_o doyma akımı;

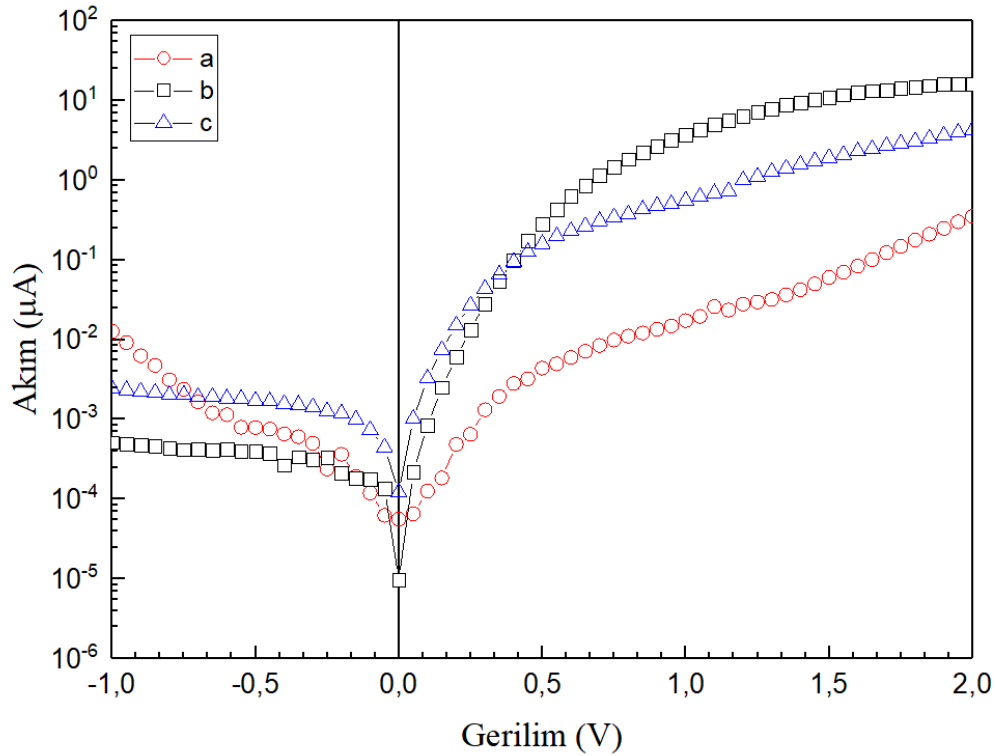
$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \quad (23)$$

şeklinde verilmektedir. Denklem (23)'in her iki tarafının doğal logaritması alınarak ϕ_b 'ye göre çözümü yapılırsa,

$$\phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (24)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir. Burada A diyodun etkin alanı $A = 0,196 \text{ cm}^2$, A^* , Richardson sabiti (n-Si için $A^* = 112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$) T, kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı ve k, Boltzman sabiti ($k = 8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$). Denklem (20)'de doyma akımı kullanılarak engel yüksekliği hesaplanır (Durmuş ve Karataş, 2018 ; Durmuş vd., 2018 ; Erdal vd., 2019 ; Nuhoğlu ve Gülen, 2009 ; Erdoğan ve Kundakçı, 2017 ; Ozerden vd., 2015 ; Badalı vd., 2018 ; Mahmood vd., 2018 ; Yıldırım ve Durumlu, 2007 ; Keffous vd., 2004 ; Okutan ve Yakupoğlu, 2008 ; Tomakin vd., 2011).

Akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen log(I)-V grafiğinin eğiminden idealite faktörünün (n) hesabı denklem (22) ile yapıldı. Akım-gerilim ölçümlerinden bariyer yüksekliği hesabı yapıldı. Bunun için log(I)-V grafiğini ekstrapole ederek doyma akımı I_o elde edildi ve bu akım değeri (Denklem (24)'de yerine koyarak) bariyer yüksekliği hesabı yapıldı.



Şekil 39. Farklı altlık sıcaklığında hazırlanan diyotların (I)-V grafiği; a) 300 K, b) 200 K, c) 100 K

300 K, 200 K ve 100 K altlık sıcaklığında üretilen numunelerin Şekil 39'dan hesaplanan parametreleri Tablo 3'de verildi.

Tablo 3. Ag/n-Si Diyotların I-V grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri

T(K)	n	Φ_b (I-V)(eV)	I_0 (A)
300	7,4	0,98	$5,56 \times 10^{-11}$
200	3,8	1,055	$7,89 \times 10^{-12}$
100	4,9	0,95	$1,5 \times 10^{-10}$

Tomakin vd. (2011b), Soğuk altlık yöntemi ile ürettiği CdS Schottky diyotların idealite faktörü ve engel yüksekliğini ; 200 K altlık sıcaklığı için sırası ile 3,14 ve 0,64 eV , 300 K altlık sıcaklığı için sırası ile 5,44 ve 0,57 eV olarak buldular. Okutan ve Yakupoğlu (2008), oda sıcaklığında ürettikleri Ag / SiO₂/n- S yapısının idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla 1,65 ve 0,73 eV olarak buldular. Keffous vd. (2004), oda sıcaklığında ürettikleri Ag / n – Si Schottky diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırası ile 1,17 ve 0,86 eV olarak buldular. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar (Tablo 3) literatür ile uyum içerisindedir.

Genelde iyi bir Schottky bariyerinin oluşumu için n tipi yarıiletken tercih edilmektedir. Bunun nedenlerinden biri temas esnasında n tipi yarıiletken bölgesinde fermi seviyesinin iletim bandına doğru kaymasından dolayı yüzey durum potansiyellerinin azalmasıdır. Yüzeyde oluşan potansiyellerin az olması durum yoğunluklarının da düşmesi ve aynı zamanda ideale yakın bir diyot demektir. Tablo 3'de görüldüğü üzere 200 K' de idealite faktörü 300 K ve 100 K'de üretilen numunelere kıyasla daha düşüktür. Aynı zamanda eşit boyutlu Ag iyonlarının plazma rezonans olayını kazanması diyot parametreleri üzerinde olumlu bir etki yapmıştır (Pal ve Mohan, 2015 ; Jin vd., 2019 ; Hong vd., 2018). Geçit esnasında nano boyutlu gümüş iyonları daha hareketli bir pozisyona sahiptir ve bu sayede daha iyileştirilmiş bir difüzyon süreci elde edildi.

3.5. Schottky Diyotlarda Seri Direnç

Metal-yarıiletken ikili yapısında oluşan tüketim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği bir direnç vardır. Bu etki büyük gerilim değerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının azalmasına neden olmaktadır (Sze, 2007).

Metal- yarıiletken ikili yapıların düz besleme I-V karakteristiklerinden Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında Cheung tarafından bir yöntem ortaya atılmıştır (Cheung and Cheung, 1986). Termoionik emisyon teorisi dikkate alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi ;

$$I = [A^*T^2 \exp(\frac{-q\phi_{Bn}}{kT})][\exp(\frac{qV_a}{nkT}) - 1] \quad (26)$$

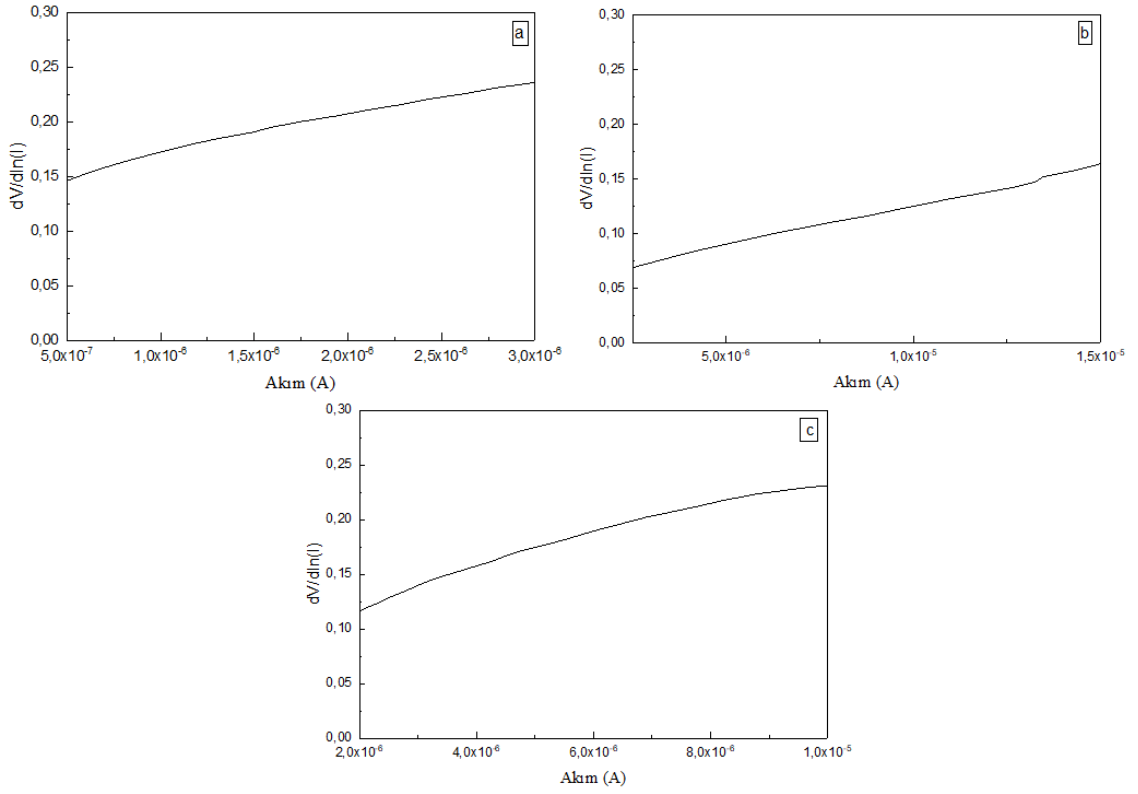
şeklinde dir. Seri direnç etkisi göz önüne alındığında uygulanan potansiyelin $I R_s$ kadarlık gerilimi nötral bölge üzerine düşer. O zaman denklem;

$$V = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I}{AA^*T^2}) + n\phi_B + IR_s \quad (27)$$

olarak elde edilir. Denklem (27)'nin akıma göre türevi alındığında;

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (28)$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre $dV/d \ln(I)$ 'in I 'ya göre grafiği bir doğru verecektir ve bu doğrunun eğimi seri direnç değerini verecektir. Aynı zamanda elde edilen doğrunun $I = 0$ ' da düşey eksenini kestiği noktadan denklem (28) ile n hesabı yapılabilir (Cheung and Cheung, 1986).



Şekil 40. Schottky diyotların $dV/d\ln(I)$ -I grafikleri; a)300 K, b)200 K, c)100 K

Şekil 40' dan hesaplanan seri direnç ve idealite faktörü değerleri Tablo 4' de verildi. Görüldüğü üzere Soliton bölgesinin olduğu 200 K altlık sıcaklığında seri direnç değeri, 100 K ve 300 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotların seri direncinden daha düşüktür (Durmuş ve Karataş, 2019 ; Erdal vd., 2019 ; Yıldırım vd, 2017 ; Tomakin vd., 2011b). I-V grafiklerinden elde edilen n değerleri ile Cheung fonksiyonları ile elde edilen n değerleri uyum içerisindedir.

Tablo 4. Ag/n-Si diyotların Cheung fonksiyonlarıyla elde edilen parametreleri

T(K)	n	R_s (k Ω)
300	6,2	30,1
200	2,7	7,2
100	4,6	15,4

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Metal-yarıiletken kontakların iyileştirilmesi ve geliştirilmesi günümüz yarıiletken teknolojisinde önemli yer tutmaktadır. Bu doğrultuda, termal buharlaştırma yöntemi ile üretilen Ag/n-Si metal-yarıiletken ikili yapıların, 100 K - 300 K altlık sıcaklığı aralığında XRD, SEM, EDS ve FESEM analizleri yapıldı ve akım-gerilim ölçümleri alınarak, altlık sıcaklığının diyot parametreleri üzerine etkileri araştırıldı.

Bu çalışmada (100) doğrultusuna ve 1-10 Ωcm öz direncine sahip n-Si üzerine Ag buharlaştırılarak yarıçapı 3 mm olan (diyot alanı $A = 0,2826 \text{ cm}^2$) Ag/n-Si diyotu oluşturuldu. Oluşturulan diyotlar UV ışınlandırma yapılarak fotouyarmalı süreçlere tabi tutuldu. Bilindiği üzere Si – Ag temasının 400 °C’ de tavlınması bu ikili yapıya bir omik özellik kazandırmaktadır. Bu olumsuz süreçten kaçınmak için difüzyon süreci UV ışınlandırma ile yapıldı.

Oluşturulan Shottky diyotlarımızın XRD spektrumlarına bakıldığında üretilen Ag/n-Si ikili yapısında gümüşe ait kırınım pikleri görülmüştür. Ag kaplı örnekler kıyaslandığında 300 K’ de (111) ve (220) gümüş piklerinin 200 K’ de etkisini kaybettiği ve sadece (200) pikinin etkili olduğu görüldü. 200 K’ den sonra ise kaybolan pik şiddetlerinin arttığı ve tercihli yönelimin değiştiği gözlemlendi. Örgü parametrelerinin de bulk değerden fazla olduğu tespit edildi.

SEM görüntülerinden soliton büyüme mekanizmasının 200 K sıcaklığından sonra meydana geldiği tespit edildi. 150 K altlık sıcaklığından sonra tekrar bozulmanın meydana geldiği ve tanecik sınırlarının belirginleştiği gözlemlendi. 5-20 s aralığındaki FESEM görüntülerinden, 200 K’ de oluşturulan kaplamanın uzun süreli buharlaştırma sonucunda daha homojen ve eşit boyutlu taneciklerle kaplandığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen EDS sonuçları incelendiğinde Ag miktarının 300 K’ den 200 K’ e doğru azaldığı ve daha sonra arttığı gözlemlendi. Daha önceki çalışmalarda gümüş miktarının altlık sıcaklığı azaldıkça arttığı belirtilmişken yapılan bu çalışmada 200 K altlık sıcaklığında üretilen numunedeki gümüş miktarı daha az olduğu tespit edildi. Bu durumun ise farklı altlık malzemelerinin kullanılmasından kaynaklandığı düşünüldü.

Ag/n-Si Schottky diyotların I-V karakteristikleri 300 K oda sıcaklığında incelendi ve diyotların yarı logaritmik doğru besleme $\ln(I)$ -V grafikleri elde edildi. Bu $\ln(I)$ -V grafiğinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. 100 K altlık sıcaklığında üretilen diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği sırası ile $n = 4,9$ ve $\Phi_b = 0,95$ olarak hesaplandı. 200 K altlık sıcaklığında üretilen diyotun sırasıyla idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri $n = 3,8$ ve $\Phi_b = 1,035$ eV olarak hesaplandı. 300 K altlık sıcaklığında üretilen diyotların sırasıyla idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri $n = 7,4$ ve $\Phi_b = 0,98$ hesaplandı. İdeal bir diyot için idealite faktörü 1'dir. Ancak ideal durumdan sapmalar idealite faktörünün 1'den büyük çıkmasına neden olmaktadır. Bu sapmalar metal-yarıiletken arasında oluşan seri direnç etkisi, oksit tabaka ve Ag/n-Si arayüzeyinde bulunan arayüzey durumlarının varlığından kaynaklandığı düşünüldü. Bu çalışmada ısısal tahribata uğratmadan fotouyarmalı difüzyon ile oluşturduğumuz 200 K altlık sıcaklığındaki numunenin ideale daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bunun başlıca nedenlerinden bir tanesi 200 K de kübik yapının ana doğrultusunda bir büyüme mevcut ve bu sayede yüzeyde oluşan potansiyeller azalmasıdır.

Seri direnç ölçüm sonuçlarına bakıldığında 200 K altlık sıcaklığında üretilen Schottky diyotun seri direncinin 100 K ve 300 K' e göre daha düşük olduğu gözükmektedir. Bunun nedeninin, gümüş katmanının büyüme mekanizması ile açıklanabilir. Böylelikle 100 K ve 300 K altlık sıcaklığında üretilen katman adacık büyüme mekanizması ile büyümesi ve tanelerin arasındaki boşluğun fazla olması direncin yükselmesine neden olmaktadır. 200 K ise bu katmanın SEM görüntülerinden görüldüğü gibi daha sıkı paketlerden oluştuğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu tezde yarıiletken teknolojisine yeni bir bakış açışı kazandırarak verimli bir şekilde kullanılacak diyotların karakteristik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında 200 K altlık sıcaklığında üretilen diyotlardaki olumlu gelişmelerin nedeni, eşit boyutlu gümüş kümelerinin UV ışını altında plazmon rezonans olayına maruz kaldığını göstermiştir.

5.ÖNERİLER

Bu çalışmada sadece 200 K soliton sıcaklığında çalışma yapılmıştır. Her bir soliton sıcaklığında eşit boyutlu kümeler meydana gelmektedir ve bu boyutlar sıcaklık değıştikçe değışmektedir. Bu sebeple, diğer soliton sıcaklık değęerlerinde (175 K, 150 K, 125 K ve 100 K) bu ikili yapıların üretilip karakteristik özelliklerinin incelenmesi önem taşımaktadır.

P tipi silisyum yarıiletkeni üzerine veya farklı bir yarıiletken üzerine (n-tipi, p-tipi) bu yeni yöntemle diyotların üretilmesi ve incelenmesi faydalı olacaktır.

Ayrıca yapılan metal-yarıiletken aygıtların dışında bu yöntemin farklı aygıtlar üzerinde denenmesi veya güneş pilleri üzerinde çalışma yapılarak, güneş pillerinin verimine ve yaşam sürelerine etkisinin incelenmesi önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Aboul-Enein, S., Badawi, M.H., Ghali, M. and Hassan, G., 1998.** Preparation and Properties Of CdS Thin Films Prepared On Cold Substrate As A Window Layer For Solar Cells. *Renewable Energy, Renewable Energy*, 14, 1-4, 113-118.
- Archer, R.J. and Atalla, M.M., 1963.** Metals Contacts On Cleaved Silicon Surface. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 101, 697-708.
- Archibald, P. and Parent, E., 1976.** *Solid State Technology*. 19, 32–40.
- Akkiliç, K., Kiliçoğlu, T. and Türüt, A., 2003.** Linear Correlation Between Barrier Heights and Idealite Factors of Sn/n-Si Schottky Diodes with and Without The Interfacial Native Oxide Layer. *Physica B: Condensed Matter*, 337, 1-4, 388-393.
- Altındal, Ş., Yücedağ, İ. veTataroğlu, A., 2009.** Analysis of Surface States and Series Resistance in Au/n-Si Schottky Diodes with Insulator Layer Using Current–Voltage and Admittance–Voltage Characteristics. *Vacuum*, 84, 363–368.
- Ambica, M., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., Ligonzo, T., Schiavulli, L., Farella, I. and Augelli, V., 2005.** *Solid State Electronics*. 49: 413-419.
- Ayyıldız, E., Nuho LU, Ç. and Türüt, A., 2002.** The Determination of the Interface-State Density Distribution from The Capacitance-Frequency Measurements In Au/n-Si Schottky Barrier Diodes. *Journal of Electronic Materials*, 31, 2, 119-123.
- Bacaksiz, E., Basol, B.M., Altunbaş, M., Novruzov, V., Yanmaz, E. and Nezir, S., 2007.** Effects of Substrate Temperature and Post-Deposition Anneal on Properties of Evaporated Cadmium Telluride Films. *Thin Solid Films*, 515, 5, 3079-3084. DOI: 10.1016/j.tsf.2006.08.026
- Bacaksiz, E., Aksu, S., Ozer, N., Tomakin, M. and Özçelik, A., 2009.** The Influence of Substrate Temperature on The Morphology, Optical and Electrical Properties of Thermal-Evaporated ZnTe Thin Films. *Applied Surface Science*, 256, 5, 1566-1572. DOI: 10.1016/j.physb.2011.08.067
- Badali, Y., Nikravan, A., Altındal, Ş. And Uslu, İ., 2018.** Effects of a Thin Ru-Doped PVP Interface Layer on Electrical Behavior of Ag/n-Si Structures. *Journal of Electronic Materials*, 47, 7, 3510-3520. DOI: 10.1007/s11664-018-6195-8
- Bates, C.W., White, J.C. and Ekeocha, C., 2007.** Transmission Electron Microscopy Study of Ag/n-Si Composites Grown on Si (111) Substrates. *Materials Science and Engineering*, 143, 38-41. DOI: 10.1016/j.mseb.2007.07.105
- Belyaev, A.P. and Rubets, V.P., 2001.** Heteroepitaxy of II–VI compound semiconductors on cooled substrates. *Semiconductors* 35: 279. DOI: 10.1134/1.1356146.

- Belyaev, A.P., Rubets, V.P. and Kalinkin, I.P., 2003.** “Soliton Heteroepitaxy” In The Formation Of Epitaxial Films Of II-VI Compounds Under Highly Nonequilibrium Conditions. Mater.Phys.Mech., 6, 58-62.
- Bengi, A., Altındal, S., Özçelik, S. ve Mammadov, T.S., 2007.** Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in AlGaAs/GaAs structures. Physica B: Condensed Matter, 396, 22-28.
- Bethe, H.A., 1942.** Theory of The Boundary Layer of Crystal Rectifiers. Mass. Inst.Techol. Radiat. Lab. Rep.,12-43.
- Buldu, İ., 2019.** TiO₂-Ag Yapıların Soğuk Altlık Yöntemiyle Üretilmesi Ve İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 97, 1-91.
- Bulgurcuoğlu, E., 2008.** Cr/Si Schottky Eklemlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 65, 18-63.
- Bouchenaki, C., Ullrich, B. and Zielenger, J.P., 1991.** Preparation Characterization and Bistable Photoconductivity Properties of Thin CdS Layers. J. Opt. Soc. Am., B8, 691-700.
- Caferov, T.,1998.** Yarıiletken Fiziği 1. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım Yayın Merkezi, İstanbul.
- Caferov, T., 1984.** Photostimulated Atomic Processes in Semiconductors, Energoatomizdat, Moscow, 136.
- Cheung, S.K. ve Cheung, N.W., 1986.** Extraction of Schotky Diode Parameters from *I-V* Characteristics. Appl. Phys. Lett., 49 (2), 85-87.
- Crowell, C.R. and Sze, S.M., 1966.** Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers. Solid-State Elect., 9, 1035.
- Çetinkara H.A., Türüt A., Zengin D.M. ve Erel S., 2003.** The Energy Distribution of the Interface State Density of Pb/p-Si Schottky Contacts Exposed to Clean Room Air. Appl. Sur. Sci., 207, 190-199.
- Demir, F.M., 2007.** CrN Kaplamalara Antibakteriyel Özellik Kazandırma Amacıyla Ag ve AgPd Katkılandırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 66.
- Dhjaferov, T.D., 1987.** Atomic Diffusion in Semiconductor Structures. Harward Academic, New York.
- Durmuş, H. ve Karataş, Ş., 2019.** The Analysis of the Electrical Characteristics and Interface State Densities of Re/n-Type Si Schottky Barrier Diodes at Room Temperature. International Journal of Electronics, 106, 4, 507-520.

- Durmuş, H., Kılıç, H.Ş., Gezgin, S.Y. and Karataş, Ş., 2018.** Analysis of Current-Voltage-Temperature and Capacitance-Voltage-Temperature Characteristics of Re/n-Si Schottky Contacts. *Silicon*, 10, 2, 361-369. DOI: 10.1007/s12633-016-9456-2
- Erdal, M., Kocyigit, A. And Yıldırım, M., 2019.** Temperature Dependent Current-Voltage Characteristics of Al/TiO₂/n-Si and Al/Cu: TiO₂/n-Si Devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104-602. DOI: 10.1016/j.mssp.2019.104620
- Erdoğan, E. and Kundakçı, M., 2017.** Room Temperature Current-Voltage (I-V) Characteristics of Ag/InGaN/n-Si Schottky Barrier Diode. *Physica B: Condensed Matter*, 506, 105-108. DOI: 10.1016/j.physb.2016.11.005
- Hong, R., Shao, W., Sun W., Deng, C., Tao C. and Zhang D., 2018.** Laser Irradiation Induced Tunable Localized Surface Plasmon Resonance of Silver Thin Film. *Optical Materials*, 77, 198-203. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.01.034
- Henisch, H.K., 1984.** *Semiconductor Contacts*. Celerondon Press, New York.
- Jin, J., Liu, C., Yang, Z. And Wang, L., 2019.** The Influence of AZO Films On Morphology and Surface Plasmon Resonance Properties of Ag Particles. *Surface and Coatings Technology*, 363, 135-141. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.02.058
- Keffous, A., Siad, M., Cheriet, A., Benrekaa, N., Belkacem, Y., Menari, H., Chergui, W. and Dahmani, A., 2004.** Comparison of Electrical and Optical Parameters of Au/n-Si and Ag/n-Si Schottky Barrier Photodiodes. *Appl. Surf. Sci.*, 236(1-4), 42-49. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.03.233
- Kukushkin S.A. and Osipov A.V., 1995.** Soliton model of island migration in thin films. *Surf. Sci.*, 329 (1-2) , 135-140.
- Lee, Y.H., Lee, W.J., Kwona, Y.S., Yeom, G.Y. and Yoon, J.K., 1999.** Effects of CdS Substrates on The Physical Properties of Polycrystalline CdTe Films. *Thin Solid Films*. 341, 172-175.
- Mahmood, O.H., Imer, A.G. ve Korkut, A., 2018.** The Comparative Study on the Electrical Parameters of Ag/n-Si and Hybrid Structure Based on Organic Interlayer. 2nd International Congress on Semiconductor Materials & Devices, Ardahan, 28-30 August, 47-51.
- Mönch, W., 1994.** Metal-semiconductor Contacts and Electronic Properties. *Surface Science*, 299-300, 928-944.
- Neamen, D. A., 1992.** *Semiconductors Physics and Devices*. R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney, 326-359.
- Nuhoğlu, Ç. and Gülen, Y., 2010.** The Effect of High Temperature Annealing on Schottky Diode Characteristics of Au/n-Si Contacts. *Vacuum*, 84, 6, 812-816. DOI:

10.1016/j.vacuum.2009.10.049

- Okutan, M. ve Yakuphanoglu, F., 2008.** Analysis of Interface States and Series Resistance of Ag/SiO₂/n-Si MIS Schottky Diode Using Current-Voltage and Impedance Spectroscopy Methods. *Microelectronic Engineering*, 85, 3, 646-653. DOI: 10.1016/j.mee.2007.11.011
- Ozerden, E., Ocak, Y.S., Tombak, A., Kilicoglu, T. And Turut, A., 2015.** Electrical and Photoelectrical Properties of Ag/n-type Si Metal/Semiconductor Contact With Organic Interlayer. *Thin Solid Films*, 597, 14-18. DOI: 10.1016/j.tsf.2015.11.013
- Pal, A.K. and Mohan, D.B., 2015.** Structural, Morphological and Optical Properties of Ag-AgO Thin Films with The Effect of Increasing Film Thickness and Annealing Temperature. *Optical Materials*, 48, 121-132. DOI: 10.1016/j.optmat.2015.07.029
- Pingsuthiwong, C., 2004.** Investigation of the Structure and Properties of Diamond-Like Carbon Films Deposited Electrochemically at Low Temperatures. (Ph.D.Diss.), University of North Texas.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988.** *Metal Semiconductor Contacts*. Clarendon Pres, Oxford, 1-47.
- Sharma, B.L., 1984.** *Metal-Semiconductor Shottky Barrier Junction and Their Applications*. Plenum Press, New York, 176 s.
- Schottky, W. and Spenke, E., 1970.** *Wiss Veroff Siemens Werken*. 18-225.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S., 2012.** İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 28, 5, 389-401.
- Sze, S.M., 1981.** *Physics of Semiconductor Devices* 2nd. Willey, New York, 245- 300.
- Sze M.S. and Kwog K.N., 2007.** *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 105-120.
- Tomakin, M., Altunbaş, M. and Bacaksız, E., 2011a.** The Influence of Substrate Temperature on Electrical Properties of Cu/CdS/SnO₂ Schottky Diode. *Physica B: Condensed Matter*, 406, 23, 4355-4360. DOI: 10.1016/j.physb.2011.08.067
- Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksız, E. and Polat, İ., 2011b.** Preparation and Characterization of New Window Material CdS Thin Film at Low Substrate Temperature (<300 K) with Vacuum Deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 2, 120-127. DOI: 10.1016/j.mssp.2011.01.015
- Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksız, E. and Çelik, Ş., 2012.** Current Transport Mechanism In CdS Thin Films Prepared By Vacuum Evaporation Method at Substrate Temperatures Below Room Temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 2, 120-127. DOI: 10.1016/j.tsf.2011.10.160

Tung, R.T., 1992. Electron Transport at Metal-Semiconductor Interfaces: General Theory. Physical Review B., 45, 23, 13509 – 13523.

URL-1, 2019. <https://tr.wikipedia.kim/wiki/G%C3%BCm%C3%BC%C5%9F> (15 Haziran 2019)

URL-2, 2019. <https://www.pvd-coatings.co.uk> (15 Haziran 2019)

Wasa, K. and Hayakawa, S., 1992. Handbook of Sputter Deposition Technology. Noyes Publication, New Jersey.

Yıldırım, N. ve Durumlu, E., 2017. Ag/Azure A /n-Si Schottky Diyodun Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerinin Araştırılması. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 6, 1, 1-6.

Yoshida, N., Oshima, R. and Fujita, F.E., 1972. Recovery and Grain of Gold Thin Deposited on the Cold Substrate. J. Phys. F: Metal Phys., 2, 2, 237-246.

Ziel, A., 1968. Solid-State Physical. Electronics, Prentice-Hall Inc., New Jersey,97-245.

ÖZGEÇMİŞ

Gizem ÖZTÜRK, 02/04/1993 tarihinde Rize'nin Pazar ilçesinde doğdu. Ortaöğretimini Rize Anadolu Öğretmen Lisesi'nde 2011 yılında tamamladı. 15/09/2011 tarihinde başladığı lisans eğitimini 17/06/2015 tarihinde Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2015 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Lisansüstü öğrenimi sırasında TUBİTAK 315M132 No'lu ve" Soğuk Altlık Tekniğiyle Gümüş Kaplanan Tianyum Esaslı Malzemelerin Biouyumluluklarının İncelenmesi" başlıklı projede 2016-2017 tarihleri arasında bursiyer olarak görev almıştır. Evli ve 1 çocuk annesidir.

Bilimsel Çalışma ve Yayınları

1- Yeşil Duymuş, Z., Ateş, S.M., Nevruzoğlu, V., Yüziak, E., Hacıoğlu, G., Yılmaz, E.Ç. and Süleyman, F., 2017. Examination of the Biocompatibility of Nano-sized Ag Layer Prepared on Ti-6Al-4V by New Experimental Procedures. 13th Nanoscience and Nanotechnology Conference, Antalya, 22-25 October, 71.