

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**NÖTRONLARA MARUZ KALAN ZnO:Al/p-Si HETEROKAVŞAKLARIN
AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNDE OLUŞAN DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah GÜNAYDIN

**Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı
Radyasyon Bilim ve Teknoloji Programı**

HAZİRAN 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**NÖTRONLARA MARUZ KALAN ZnO:Al/p-Si HETEROKAVŞAKLARIN
AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNDE OLUŞAN DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Emrah GÜNAYDIN
302111005**

Nükleer Araştırmalar Anabilim Dalı

Radyasyon Bilim ve Teknoloji Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nilgün DOĞAN BAYDOĞAN

HAZİRAN 2014

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 302111005 numaralı Yüksek Lisans/Doktora öğrencisi, "Emrah GÜNAYDIN", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "NÖTRONLARA MARUZ KALMIŞ ZnO:Al/p-Si HETEROKAVŞAKLARIN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNDE OLUŞAN DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Nilgün DOĞAN BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. A. Beril TUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Mayıs 2014
Savunma Tarihi : 28 Mayıs 2014

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında nötronlara maruz kalan ZnO:Al/p-Si heterokavşakların elektriksel yapısındaki değişimi araştırmak amaçlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana her türlü yardımı eden, her sorunuma cevap bulan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Nilgün DOĞAN BAYDOĞAN'a en içten dileklerle sonsuz teşekkür ederim.

İnce film kaplama laboratuvarı olanaklarından yararlanmama izin veren İTÜ Kimya – Metalurji Fakültesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.. İTÜ TRİGA Mark-II Reaktörü'nde ışınlama çalışmalarında emeği geçen tüm personele teşekkürlerimi sunarım.

Bütün hayatım boyunca her konuda beni her zaman destekleyen ve bugünlere gelmem de en büyük pay sahibi olan değerli AİLEM'e sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2014

Emrah GÜNAYDIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
SEMBOLLER	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. İNCE FİLMLER	3
2.1 İnce Filmler Hakkında Genel Bilgi ve Hazırlama Teknikleri	3
2.2 Sol Jel Yöntemi	5
2.2.1 Daldırarak kaplama yöntemi	8
2.2.2 Döndürerek kaplama yöntemi	10
3. YARI İLETKENLER	13
3.1 n-tipi ve p-tipi Yarı iletkenler.....	14
3.1.1 Donor (Verici) veya n-tip safsızlık	15
3.1.2 Akseptör (Alıcı) veya p-tip safsızlık	16
3.2 Diyotlar ve Özellikleri	16
4. RADYASYONUN MALZEME ÜZERİNE ETKİSİ	21
4.1 Radyoaktivite ve Radyasyon Tipleri	21
4.1.1 Radyoaktivitenin keşfi	21
4.1.2 Radyoaktivite	22
4.1.3 Radyasyon tipleri	24
4.1.3.1 Alfa bozunumu	25
4.1.3.2 Beta (β^-) bozunumu	26
4.1.3.3 Elektron yakalama	26
4.1.3.4 Pozitron (β^+) yayılım	26
4.2 Radyasyonun Malzemeyi Etkileme Mekanizmaları.....	27
4.2.1 Yüklü parçacıklar	28
4.2.1.1 Ağır yüklü parçacıklar.....	28
4.2.1.2 Hafif yüklü parçacıklar	29
4.2.2 Yüksüz parçacıklar.....	30
4.2.2.1 Fotonlar	31
4.3 Nötronların Malzeme ile Etkileme Mekanizmaları.....	33
4.3.1 Elastik saçılma	34
4.3.2 Elastik olmayan saçılma.....	36

4.3.3 Nötron yakalama	36
4.4 Yarı iletken Malzemelerin Radyasyon Karşısındaki Davranışları	37
5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
5.1 Solün Hazırlanması	39
5.2 Kaplama Malzemesinin Hazırlanması.....	40
5.3 Yapılan Kaplama İşlemleri.....	40
5.4 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların I-V Karakteristiklerinin Ölçümü İçin Hazırlanması.....	41
5.5 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nde Nötronlara Maruz Kalması	42
5.6 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların Işınlama İşlemlerinin Gerçekleştirildiği İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün Teğetsel Işınlama Tüpü.....	43
6.DENEY SONUÇLARI.....	45
6.1 Nötronlara Maruz Kalan p-Si taşıyıcılar Üzerinde Tavlanmış ZnO:Al İnce Filmlerin Yüzeyindeki Elektriksel Direncinde Oluşan Değişimler	45
6.1.1 Nötronlarla ışınlanması sonucu farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al ince filmlerin yüzeyindeki elektriksel dirençlerinin değişimi	45
6.1.2 Nötronlara maruz kalan vakumda tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerde tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler	45
6.1.3 Farklı atmosferlerde p-Si tabaka üzerinde tavllanmış ZnO:Al ince filmlerin nötronlarla ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler	47
6.2 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların I-V karakteristiklerinin İncelenmesi.....	48
6.2.1 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerinin incelenmesi....	48
6.2.2 Farklı miktarda Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerinin incelenmesi....	49
6.2.3 1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerinin incelenmesi.....	54
6.3 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların I-V karakteristiklerinin Mukayeseli Olarak İncelenmesi	56
6.4 Reaktör Nötronlarına Maruz Kalmış ZnO:Al/p-Si İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinde Oluşan Değişimlerin Mukayeseli Olarak İncelenmesi.....	60
7.GENEL SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

UV-VIS	: Ultraviole Visible Spectroscopy (Ultraviyole Görünür Bölge Spektroskopisi)
CD	: Compact Disk (Yoğun Disk)
DVD	: Digital Versatile Disc (Çok Amaçlı Sayısal Disk)
LED	: Laser Emitting Diode (Lazer Yayan Diyot)
MeV	: Mega Elektron Volt
eV	: Elektron Volt
TRIGA Mark II	: Training Research Isotope Production General Atomic Mark II
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
At.	: Atomik
PET	: Pozitron Emisyon Tomografisi
fcc	: Face Cubic Center (Kubik Kristal Sistemi)
CPEP	: Contemporary Physics Education Project

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Atomik kütle biriminden kütle artışına göre listelenmiş çeşitli çekirdekler ile nötronun çarpışması sonucu kaybedilen kinetik enerjinin maksimum kesiti.....	36
Çizelge 4.2 : Değişik tip ve enerjideki radyasyonun oluşturduğu yer değiştirme hasarı göreceli karşılaştırılması.....	38

SEMBOLLER

ZnO	: Çinko oksit
Zn(CH₃COO)₂·2H₂O	: Çinko asetat dihidrat
DEA(CH₂CH₂OH)₂	: Dietanolin
ZnO:Al	: Al katkılı çinko oksit
M(OR)_n	: Alkoksit
M	: Metal
Al	:Aluminyum
Zr	:Zirkonyum
Si	:Silisyum
CH₃, C₂H₅	: Alkali grubu
CO₂	: Karbondioksit
O₂	: Oksijen
h	: Filmin kalınlığı
η	: Sıvının viskozitesi
U	: Daldırma hızı
γ_{LV}	: Sıvı–buhar yüzey gerilimi
ρ	: Solün yoğunluğu
g	: Yerçekimi ivmesi
h(t)	: ρ yoğunluğundaki, viskozitesi η olan ve ω açısal hızıyla döndürülen filmin t süre sonraki kalınlığı
h(0)	: Filmin başlangıçtaki kalınlığı
ω	: Açısal hız
CdS	: Kadmiyum sülfür
ZnS	: Çinko sülfür
Sb	: Antimon
B	: Bor
V	: Voltaj
I	: Akım
A	: Aktivite
λ	: Bozunma sabiti
N	: t zaman sonraki çekirdek sayısı
N₀	: Başlangıçtaki toplam çekirdek sayısı
t	: Zaman
He	: Helyum
Ra	: Radyum
Rn	: Radon
α	: Alfa
n	: Nötron
p	: Proton
ν	: Nötrino
Al(NO₃)₃·9H₂O	: Aluminyum nitrat nonahidrat
β⁺	: Pozitron

β^-	: Negatron
e	: Elektron
e^+	: Pozitron
e^-	: Negatif iyon
E_e	: Fotoelektronun enerjisi
E_γ	: Soğurulan gama ışınının enerjisi
BE_e	: Atomik elektronun bağlanma enerjisi
γ	: Gama ışını
E	: Enerji
E'	: Saçılan foton enerjisi
E	: Gelen foton enerjisi
θ	: Fotonun saçılma açısı
${}_2\text{H}$: Döteryum
Ne	: Neon
Na	: Sodyum
${}_{12}\text{C}$: Grafit
M	: Çekirdeğin kütlesi
m_n	: Nötronun kütlesi
β	: Geritepki çekirdeğinin nötronun geliş yolu ile yaptığı açı
D_2O	: Ağır su
C_nH_{n+2}	: Parafin
${}^{236}\text{U}$: Uranyum-236
J	: Jul
kg	: Kilogram
Pa	: Paskal
mR	: Miliröntgen
Z	: Atom numarası
L	: Kolimatör deliğinin uzunluğu

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İnce film hazırlama teknikleri.....	5
Şekil 2.2 : Sol-gel tekniği ile ince film kaplanmasının şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.3 : Daldırarak kaplama yönteminin adımları.....	9
Şekil 2.4 : Sol - Jel döndürme yöntemi ile kaplama.....	11
Şekil 3.1 : İletkenlik derecesine göre değişen bant enerjileri (a) İletken, (b) Yarı iletken, (c) Yalıtkan.....	13
Şekil 3.2 : Saf silikon kristali, verici safsızlık antimon atomu ve alıcı safsızlık bor atomunun yapısını ve yarı iletkenlerin dokusunu gösteren diyagramlar...16	16
Şekil 3.3 : Tipik bir silikon diyotun ayrıntılı gösterimi.....	17
Şekil 3.4 : (a) İdeal diyotun sembolü ve (b) ideal diyotun karakteristiği.....	17
Şekil 3.5 : pn eklemının şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.6 : $V=0$ 'da pn ekleminde kıtlık bölgesinin oluşumu.....	19
Şekil 3.7 : (a) İleri beslemeli ve (b) geri beslemeli pn eklemının enerji bant diyagramı.....	20
Şekil 4.1 : Radyasyonun manyetik alan içerisindeki davranışı.....	21
Şekil 4.2 : Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması.....	24
Şekil 4.3 : Atomun yüklü bir parçacıkla iyonizasyonu.....	28
Şekil 4.4 : Atomun uyarılması.....	29
Şekil 4.5 : Alfa ve beta parçacıklarının menzili.....	30
Şekil 4.6 : Fotoelektrik olayın şematik gösterimi.....	31
Şekil 4.7 : Compton saçılmasının şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.8 : Çift oluşumunun şematik gösterimi.....	33
Şekil 4.9 : Nötronların çekirdek ile elastik çarpışmasının gösterimi.....	35
Şekil 5.1.: Nötronlara maruz kalan Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki yapı.....	41
Şekil 5.2 : İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün ışınlama düzeneklerinin yatay kesiti.....	42
Şekil 5.3 : İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün teğetsel ışınlama tüpü.....	43
Şekil 6.1 : Farklı konsantrasyonda Al katkılı Azot ortamında 700 °C'de tavlaniş ZnO:Al/p-Si ince filmlerin özdirençlerinin ışınlama süresi ile değişimi.....	46
Şekil 6.2 : Vakum ortamında değişik sıcaklıklarda tavlaniş ZnO:Al/p-Si ince filmlerin özdirençlerinin ışınlama süresi ile değişimi.....	46
Şekil 6.3 : Farklı atmosferlerde p-Si tabaka üzerinde tavlaniş ZnO:Al ince filmlerin nötronlarla ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak yüzeysel elektrik direncinde oluşan değişimler.....	47
Şekil 6.4 : 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavlaniş ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	48

Şekil 6.5	: 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi.....	49
Şekil 6.6	: 0,8 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	50
Şekil 6.7	: 0,8 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi.....	51
Şekil 6.8	: 1,0 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	51
Şekil 6.9	: 1,0 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi.....	52
Şekil 6.10	: 1,2 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	52
Şekil 6.11	: 1,2 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi.....	53
Şekil 6.12	: 1,6 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	53
Şekil 6.13	: 1,6 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	54
Şekil 6.14	: 1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.....	55
Şekil 6.15	: 1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi.....	55
Şekil 6.16	: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri.....	56
Şekil 6.17	: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri.....	57
Şekil 6.18	: Farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri.....	57
Şekil 6.19	: Farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri.....	58
Şekil 6.20	: Farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu.....	58
Şekil 6.21	: Farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	59
Şekil 6.22	: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	59
Şekil 6.23	: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	60
Şekil 6.24	: Reaktör nötronlarına maruz kalmış, farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	61
Şekil 6.25	: Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	61
Şekil 6.26	: Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin karanlık ortamda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....	62

Şekil 6.27 : Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si ince filmlerin aydınlık ortamlarda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.....62

NÖTRONLARA MARUZ KALMIŞ ZnO:Al/p-Si HETEROKAVŞAKLARIN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİNDE OLUŞAN DEĞİŞİMLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu Yüksek Lisans tezinde reaktör nötronlarına maruz kalmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinde oluşan değişimler incelenmiştir.

Günümüzde araştırmalarda ince filmler elektronik aygıt teknolojisinin temelini oluşturmaktadırlar. Çinko oksit (ZnO) güneş pili, UV lazerler ve LED'lerde gibi fotoelektronik uygulamalar için gelecek vaad eden optoelektronik malzeme olarak göz önüne alınmaktadır. ZnO:Al ince filmlerin radyasyon karşısındaki elektriksel davranışlarında oluşan değişiklikler elektronik düzeneklerde ilgi çekici bir konudur. ZnO:Al/p-Si heterokavşaklar p tipi silikon tabakalar ve cam taşıyıcılar üzerinde sol-jel daldırarak kaplama tekniği ile oluşturulmuştur. Bu amaçla, ZnO:Al ince filmler sol-jel daldırarak kaplama yöntemi kullanılarak farklı Al konsantrasyonlarında katkılanarak, farklı tavlama sıcaklıklarında ve farklı ortamlarda tavlansak üretilmiştir. Al katkılı çinko oksit (ZnO:Al) ince filmler termal nötronların ince film üzerinde oluşturduğu etkiyi incelemek amacıyla İTÜ TRİGA Mark-II Eğitim ve Araştırma reaktöründe reaktör nötronlarına maruz bırakılmıştır. ZnO:Al ince filmler ve ZnO:Al/p-Si heterokavşaklar, İTÜ TRİGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün Teğetsel Işınlama Tüpü'nde termal nötronlara maruz bırakılmıştır.

Termal nötronlara maruz kalmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım – voltaj (I-V) ve akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Teğetsel Işınlama Tüpü'ndeki kolimatöre yerleştirilen örneklerin, ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak elektriksel iletkenliğinde artış olduğu tespit edilmiştir. Omik kontakt elde edilen Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki heterokavşakların akım – voltaj (I-V) ve akım yoğunluğu-voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir. Işınlanmış filmlerdeki en düşük yüzey direnci vakumda 700°C'de tavlansak olan ve 1.2 at. % Al konsantrasyonunda katkılı filmde tespit edilmiştir. Işınlanmamış ZnO:Al ince filmlerin I-V karakteristiklerinde oluşan değişimler reaktör nötronları ile ışınlanmış ZnO:Al ince filmler ile karşılaştırılmıştır. Nötronların elektriksel karakteristikler üzerine etkisi ışınlanmış ve ışınlanmamış hal için değerlendirilmiştir.

THE INVESTIGATION OF THE CHANGES IN THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF ZnO:Al/p-Si HETEROJUNCTIONS IRRADIATED BY NEUTRONS

SUMMARY

In this master thesis, the changes in the current-voltage (I-V) characteristics of ZnO:Al/p-Si heterojunctions irradiated by neutrons are investigated.

Nowadays, the thin films constitute the bases of the technology of electronic devices in the researches. Zinc oxide (ZnO) is considered as a promising optoelectronic material for photoelectronic applications such as solar cells, UV lasers and LEDs. The changes in electrical behaviours of the ZnO:Al thin films against the radiation is an interesting subject at the electronic devices. ZnO:Al/p-Si heterojunctions were fabricated by sol-gel dip coating technique onto p-type Si wafer and glass substrates. For this reason, ZnO:Al thin films produced at different Al concentrations, annealing temperatures and atmospheres by sol-gel dip coating technique. Al doped Zinc oxide (ZnO:Al) thin film was irradiated to examine the effect of thermal neutrons on the thin film by reactor neutrons at ITU TRIGA Mark-II Training and Research Reactor. ZnO:Al thin films and ZnO:Al/p-Si heterojunctions were irradiated by thermal neutrons in the tangential beam tube of ITU TRIGA Mark-II Training and Research Reactor.

Current-Voltage (I-V) and Current Density – Voltage characteristics of ZnO:Al/p-Si heterojunctions irradiated by thermal neutrons were investigated in dark and light. The changes of Current-Voltage (I-V) and Current Density – Voltage characteristics of the heterojunctions were evaluated at Cu/ZnO:Al/p-Si/Al configuration obtained ohmic contact . It is determined that the electrical conductivity of the samples placed in the collimator of tangential beam tube increased with the rise of the irradiation time. The lowest surface resistivity of the irradiated ZnO:Al thin film was determined that the film was annealed in vacuum at 700°C with 1.2 at. % Al concentration. The changes of I-V characteristics of the unirradiated ZnO:Al thin films were compared with the irradiated ZnO:Al by reactor neutrons. The effect of neutron irradiation on the electrical characteristics of the ZnO:Al thin film was evaluated for the unirradiated and the irradiated states.

1. GİRİŞ

Çinko oksit (ZnO) ince filmler yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin iyi sonuç vermesinden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Katkısız ZnO ince filmler saydam iletkenlerde (Gonzales ve diğ,1998), güneş pili camlarında, gaz algılayıcılarda (Valle ve diğ, 2004) yüzey ses dalga devrelerinde ve düz panel göstergelerinde elektronik ve optoelektronik devre aygıtı olarak kullanılmaktadır. ZnO ince filmler optoelektronik gösterge aygıtlarında ve ultra yüksek frekans elektro-ses dönüştürücülerinde kullanılırlar. Çinko oksit pahalı olmayan n tipi yarı iletken bir malzemedir. UV-VIS spektrumu verimli bir soğurum kenarına sahip ZnO, iletken bir malzemedir. İletkenliği tavlama ve katkılandırma ile kolaylıkla kontrol edilebilir. ZnO ince filmler düşük maliyetinden, zehirli olmamasından ve kolayca katkılandırılmasından dolayı araştırmacıların ilgisini çeken bir malzemedir. ZnO ince filmler, sputtering, spray pyrolysis, metal organik kimyasal depolama, iyon demeti buharlaştırma, darbeleri lazer depolama gibi farklı tekniklerle hazırlanır. Sol-Jel işlemi hidroliz ve yoğunlaştırma reaksiyon tabanlı bir işlemdir. En genel işlemlerde metal alkol oksit kullanılır, fakat solün hazırlanmasında metal alkol oksitlerin reaksiyona girmesi özelliklerinden dolayı, sol hazırlama işlemi zor olabilmektedir. Alkol oksitler birçok alkol içinde çözülmezler ve çok pahalıdırlar (Silva ve diğ, 2002). Bu nedenle, birçok araştırmacı ince film hazırlanırken metal alkol oksit yerine asetat gibi bazı metal tuzları, metal nitrati kullanmayı tavsiye eder. Çinko asetat ucuz ve kolay elde edilir bir madde olduğu için deneysel çalışmalarda tercih edilir (Bao ve diğ. 1998; Şener, 2006).

Bu çalışmada, ZnO ince filmler, p tipi Si plakalar üzerinde, sol-gel daldırma yöntemi kullanılarak $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ elde edilmiştir. Filmlerin 200-1100 nm dalga boyu aralığında geçirme spektrumları belirlenerek, film kalınlıkları ve optiksel bant aralıkları hesaplanmıştır. Nötronlara maruz kalan ZnO:Al, ince filmlerin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler belirlenmiştir.

2. İNCE FİLMLER

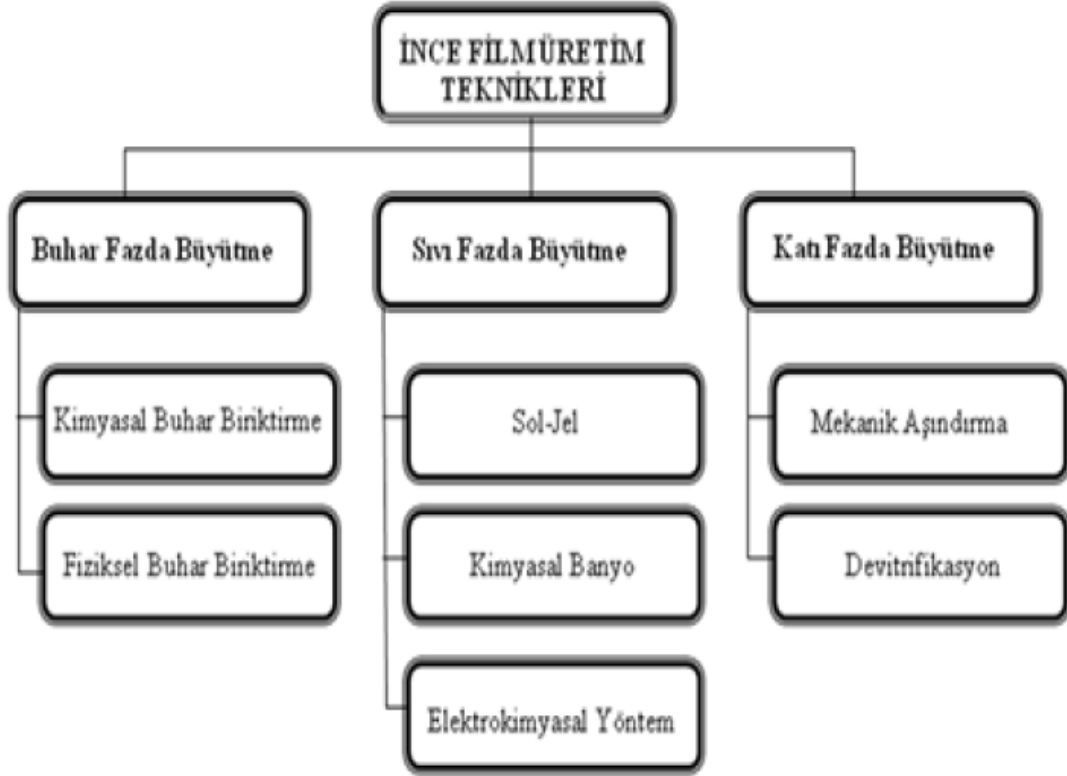
2.1 İnce Filmler Hakkında Genel Bilgi ve Hazırlama Teknikleri

İnce filmlerin tarihsel süreçte ilk olarak karşımıza çıkması soy metallere dayanarak yapılan ince filmlerin cam ve seramik kaplamasında dekoratif olarak kullanılmasıdır. Bu süreçten sonra 1940'lı yıllardan itibaren ince film teknolojisi üzerine olan ilgi artarak günümüze kadar taşınmıştır. Mikro ve nano yapıları optoelektronik malzeme sanayisinin temel taşı olan, teknolojik ve bilimsel araştırmalarda önemli bir yer tutan ince filmler, son zamanlarda üstüne en çok çalışma yapılan güncel araştırma konularından biridir. İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, filmi destekleyerek filmin oluşumuna yardımcı olan bir taban üzerine dizilmesi ile ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları genel olarak 1 nm ile 1 µm arasında değişkenlik gösteren malzemelerdir. İnce film yapısında nano kristal malzemeler, bu malzemelerle yapılan malzeme ve araçların optik, mekanik ve elektriksel gibi temel karakteristik özelliklerinin müthiş oranlarda artırılmasına imkân vermektedir. Bu tip malzemelerde, materyali oluşturan parçacık sayısının artmasından dolayı katı yapıdan moleküler yapıya doğru aşamalı bir geçiş gözlenmektedir. Ayrıca bir ince filmin nano kristal büyüklüğü, malzemenin bant yapısını etkilediği için, malzemeyi oluşturan parçacıkların yeterince küçük olması yük taşıyıcılarının kuantum sınırında bulunmasını ve bant yapılarının kesikli enerji seviyelerine ayrışmasına neden olmaktadır. Günümüzde teknolojik gelişmelerin temel ve belirleyici unsurlarından birini oluşturan ince film teknolojisi, insanlığın kullandığı kişisel bilgisayar ve donanımlardan, haberleşme sistemlerine kadar çoğu elektronik aracın içinde bulunmaktadır. Farklı amaçlara hizmet eden ince filmler çeşitli özellikleri dikkate alınarak farklı teknolojik uygulamalarda kullanılırlar. Elektriksel özellikleri sayesinde yarı iletken/süperiletken cihazlarda, yalıtım ve iletim kaplamalarında, devre elemanı yapımında, optiksel özelliklerinden dolayı yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan kaplamalarda, girişim filtrelerinde, optiksel disklerde, manyetik

özelliklerinden dolayı hafıza disklerinde, kimyasal özelliklerinden dolayı oksidasyon veya korozyona karşı korumada, sensörlerde ve bunlar gibi daha birçok uygulamada ince filmler kullanılmaktadır. Günümüzde ince film malzemelerindeki ve gereçlerindeki hızlı değişim; yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojilerin gelişimi için yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu yüzden, çeşitli uygulamalardaki ince film performans ve yapısı ile ilgili temel fiziksel ve kimyasal özelliklerin önceden bilinen özelliklerini geliştirmek ve bu alandaki ilerlemeyi artırmak için birçok deney yapılmış ve model sistemleri geliştirilmiştir. Deneysel ve teorik incelemelerin birleştirilmiş sonuçları, yeni ince film sistemlerinin geliştirilmesi ile yapı ve performanslarının şekillendirilmesinde bir önkoşuldur. Üretilmek istenilen büyük ve geniş örnekler değil, kaplanmak istenilen alt malzemeye göre kolayca biriktirme işlemi yapılabilen bir yöntem olduğundan ötürü ince film üretimi entegre edilecek malzemeye göre pahalı olmayan bir yöntemdir. İnce filmler beklenen fonksiyonları gösterebilmeleri için uygun kalınlık, bilyim ve karakteristik özelliklere sahip olmalıdırlar. Dolayısıyla, farklı üretim metotları ve birbirinden farklı alt malzemelerin üzerine üretimi denenerek daha kaliteli ince filmlerin üretim çalışmaları yapılmaktadır. (Sönmezoğlu ve diğ, 2012)

İnce filmler daha önce de bahsedildiği üzere ilk olarak dekoratif amaçla kullanılmıştı. Daha sonra, gümüş tuzları kullanılarak, cam yüzeyler üzerinde gümüş filmleri elde edilmiştir. 19.yüzyıldan itibaren bilimsel çalışmalardaki artış, daha yeni ve daha modern ince film elde etme yöntemlerini de beraberinde getirmiştir. İlk ince film, 1838’de “elektroliz” yöntemi ile elde edilmiş olup, daha sonra 1852’de Bunsen “kimyasal reaksiyon” yöntemiyle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt “Joule ısıtması” yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Ancak, ince filmler üzerinde yapılan bu çalışmalar, vakum cihazlarının gelişmesine kadar laboratuvar çalışmaları olarak kalmıştır. Vakum cihazları geliştirildikten sonra modern yöntemlerle elde edilen ince filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Temel olarak ince film üretim teknikleri, malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine imkan sağlayan depolama teknikleri, depolanacak olan malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi çeşitli alt gruplara ayrılmaktadırlar.

Bu çalışma da bu tekniklerden sol jel yöntemi kullanılarak ince film elde edilmiştir.



Şekil 2.1 İnce film hazırlama teknikleri

2.2 Sol Jel Yöntemi

Sol-jel kaplama tekniği cam, seramik, metaller ve polimerlerin yüzeylerindeki elektriksel, kimyasal ve mekanik özellikleri arttırmak için uygulanan yaygın bir yöntemdir. Sol-Jel yöntemi kullanılarak hazırlanan ve üretilen malzemeler üç ana sınıfa ayrılabilir: dökme camlar, kaplamalar ve fiberler. (Klein, 1988)

Sol ; sıvı içerisinde koloidal katı taneciklerinin kararlı bir süspansiyonudur.

Jel ; Koloidal parçacıkların çöktürülmesiyle elde edilen ve bol miktarda su içeren çökeklere denir. Jel, katı ve sıvı faz arasında bir ara fazdır. (Toplan, 2010)

“Sol” için başlangıç malzemeleri inorganik metal tuzları ya da metal inorganik bileşenlerdir. Tipik bir sol-jel sürecinde ana malzeme çözücü içinde çözünüp bir seri hidroliz ve polimerizasyon tepkimeleri ile koloidal bir yapı olan “sol”e dönüşür. Koloidal yapılar heterojen ile homojen yapılar arasındadır. Çözülen tanecikler çok küçük tanecikler olmasa da çökme meydana gelmez ve çözücünden ayrılmazlar.“Sol”

19 üzerinde devam eden süreçler sonunda farklı formlarda seramik malzemeler üretilebilir. İnce filmler ise bir alt tabaka üzerine “sol” ün döndürme, püskürtme, daldırma kaplama yöntemleri ile kaplanmasıyla üretilir. “Sol” bu alt tabaka üzerine kaplandığında ıslak jel (xerojel) haline dönüşecektir. Daha sonra sıcaklık uygulanması ve kurutma ile yoğun jel haline geçerek ince film meydana gelecektir (Hasançebi, 2006).

Sol-jel yönteminin basamakları aşağıdaki gibi sayılabilir;

Alkoksit hidrolizi

Peptidleşme veya polimerizasyon

Jel eldesi

Kalsinasyon / Sinterleme

Alkoksit hidrolizi metal alkoksitlerin (M(OR)_n) hidrolizi, alkoksitlerin suya beslenmesi ve kuvvetli karıştırma ile gerçekleşir. Kararlı bir kolloid yapı elde edilmesi için su miktarı alkoksit miktarına göre daha fazla olmalıdır.

Hidroliz reaksiyonu aşağıda verilmiştir;



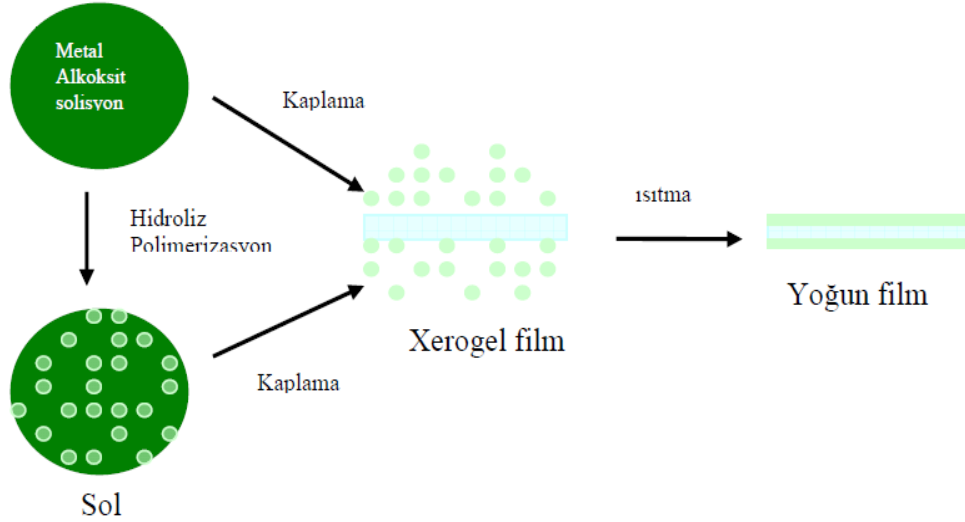
Negatif iyonlu OH grubu, merkezdeki pozitif iyonlu metal iyonuna eklenir. Pozitif yüklü proton, alkoksil grubuna transfer olur. Daha sonra ROH açığa çıkar. Tepkime çift yönlü gerçekleşen bir tepkime olup, bir tarafta su molekülleri açığa çıkarken ve jelleşme gerçekleşirken, diğer tarafta kondenzasyon gerçekleşir. Kondenzasyon, ROH ve H₂O'nun hidrolize olmuş alkoksit grubu ile polimerizasyon reaksiyonudur.

Kondenzasyon reaksiyonu, üç kademede ilerler;



M; Metal (Al,Zr,Si..) R; Alkil Grubu (CH₃, C₂H₅...)

Hidroliz olayı, su miktarı, katalizör tipi, çözücü konsantrasyonu ve sıcaklıktan etkilenir. Hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları ile polimerize oksit yapı oluşur. Çözeltideki polimerler yoğunlaşma reaksiyonu ile büyürler. Bir süre sonra tek ve büyük bir polimer kütlesi bütün çözeltiyi kaplar. Bu nokta solden jele geçiş noktasıdır (Eserci, 2007).



Şekil 2.2 Sol-gel tekniği ile ince film kaplanmasının şematik gösterimi
(Hasançebi,2006)

Sol – Jel yönteminin avantajları;

- ✓ Klasik eritmeyle üretimi zor olan, erime sıcaklıkları yüksek ve soğuma sırasında kristallenme eğilimi gösteren maddelerden düşük sıcaklıklarda camlar elde edilir.
- ✓ Çok çeşitli elementlerin katılımıyla yeni ve değişik türde seramik ve camlar yapılır.
- ✓ Ürünler yüksek saflıkta elde edilir. Ortamdan gelen safsızlıklar ve reaksiyon kabıyla etkileşim oldukça düşüktür. Bu özellikten dolayı optik ürünlerde önemli avantajlar sağlar.
- ✓ İşlem sırasındaki karıştırma moleküler düzeyde olduğundan üretilen seramik ve camlar homojen bir yapıya sahiptir. Bu özellikten yine optik malzemeler üretiminde faydalanılır.
- ✓ Polimerizasyon sırasında jel içinde değişik zincir uzunluğunda polimer moleküllerinin bulunması ve işlem sırasında bunların kısmen faz ayrımına uğramaları nedeniyle seramik yapıda bileşim farklılığı göstermeden yapısal değişiklikler gösteren bölgelerin oluşabilmesi mümkündür.
- ✓ İşlem için gerekli ısı işlem sıcaklıkları genellikle 10000 C' nin altında olduğundan önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanır.

- ✓ Eritme işleminde buharlaşmadan kaynaklanan kayıplar bu yöntemde en aza indirilir.

Sol – Jel yönteminin dezavantajları ise;

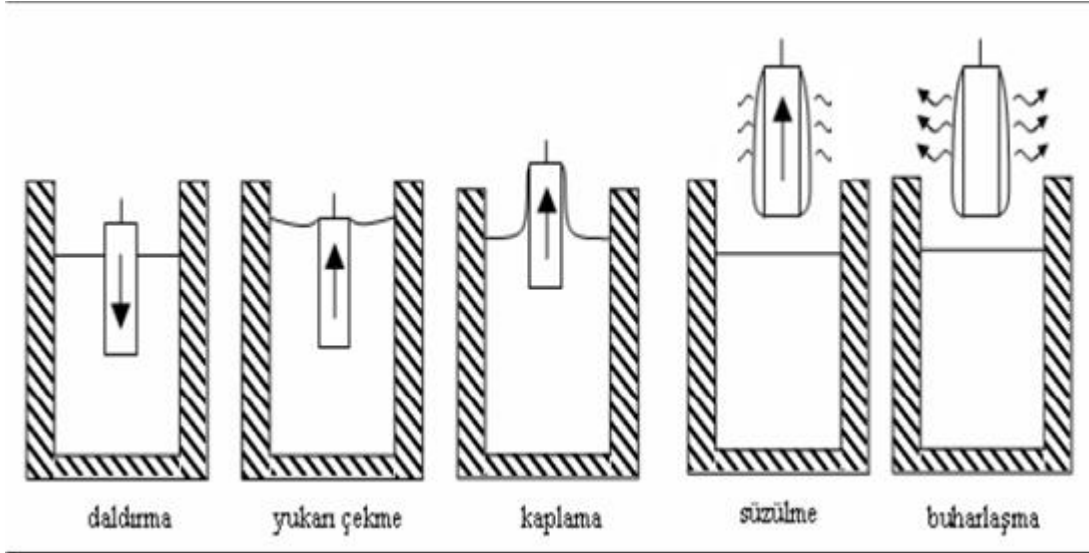
- ✓ Hammadde fiyatları yüksek olduğundan uygulamalar bazı özel seramikler ve kaplama üretimi ile sınırlıdır.
- ✓ İşlem süresinin uzunluğu üretim miktarını kısıtlayıcı bir faktördür. Yürüyen hat üzerinde kaplama mümkün değildir.
- ✓ Kullanılan organik hammaddelerin sağlığa zararlı olmaları uygulamalarda özel koruyucu tedbirler alınmasına neden olduğundan maliyet artar.

Jel içinde kalan porlar, hidroksil iyonları ve karbon atomları bazı özel amaçlı seramiklerde hataya neden olur (Palalı, 2005).

Sol-jel yöntemi, teknolojik öneme sahip olmasından dolayı birçok alanda sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Sol-jel yöntemi metallerin ve tarihi eserlerin korozyona karşı korunması, polimer ve porselen gibi malzemelerin kimyasallara ve neme karşı dayanıklılığının artırılması, gaz geçirgenliğinin (CO₂, O₂ gibi) azaltılması, yüzey sertliği ve dayanımının artırılması, plastik ve camların buğulanma ve buzlanmaya karşı korunması gibi otomotiv, gıda, beyaz eşya, cam, elektronik ve telekomünikasyon sahalarında günümüzde yaygın olarak pek çok kullanım alanına sahiptir (Boztoprak ve diğ, 2007).

2.2.1 Daldırarak kaplama yöntemi

Sol–jel ile kaplama yöntemlerinin en önemlilerinden birisi daldırarak kaplama yöntemidir. Saydam iletken tabakaların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yöntem, bir cam taşıyıcının, hazırlanan sol içerisine sabit bir hızda daldırılıp aynı hızda geri çıkarılması yoluyla film kaplanması işlemidir. Bu yöntemle kaplama yapıldığı zaman film kalınlığı, taşıyıcı sole daldırılıp çıkarıldığı esnada zamana bağlı olarak değişmez. Şekil 2.3’de yöntemin yapım aşaması gösterilmiştir (Toplan, 2010).



Şekil 2.3 Daldırarak kaplama yönteminin adımları

Daldırarak kaplama yöntemi; daldırma, yukarı çekme, kaplama, süzülme ve buharlaşma (alkol gibi uçucu çözücüler kullanıldığında buharlaşma normal olarak yukarı çekme, kaplama ve süzülme aşamalarında da gerçekleşir) olmak üzere 5 kategoriden oluşmaktadır.

Daldırma aşamasında taşıyıcı sabit bir hızla solün içine daldırılır. Daha sonra yukarı çekme aşamasında, daldırıldığı hızla (10-107 mm/dak) beklenmeden yukarı çekilir. Kaplama aşamasında ise taşıyıcının sol ile temasa giren kısımları kaplanmış olur.

Bu aşamada etkili olan kuvvetler:

- sol ile taşıyıcı arasındaki sürtünme kuvveti,
- solün taşıyıcıya tutunmasından oluşan yüzey gerilimi kuvvetidir.

Süzülme aşamasında yukarıda saydığımız kuvvetlerin etkisi altında bazı sol damlacıkları taşıyıcının kenarlarından süzülerek yüzeyi terk eder. Buharlaşma aşamasında; süzülme aşamasında süzilemeyen sol damlacıkları buharlaşarak uçar. En son olarak taşıyıcı üzerinde kalan sol, fırınlama işlemi sonucu film haline dönüşür.

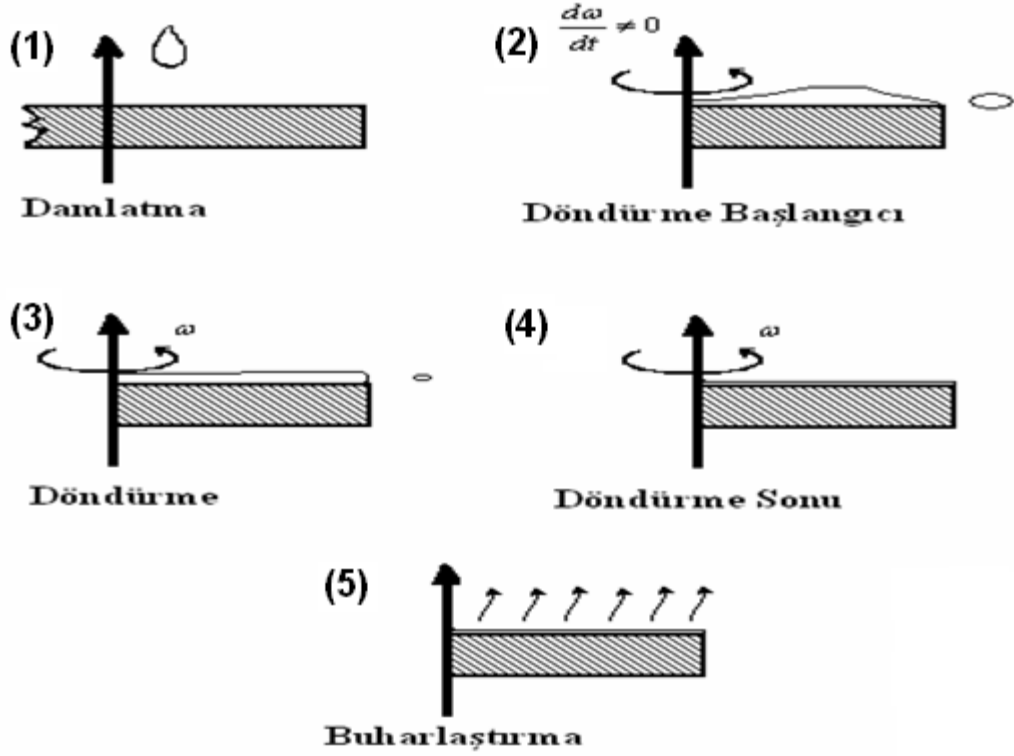
Daldırma yönteminde kaplanan filmin kalınlığı; geri çekme hızı, yer çekimi ivmesine bağlı olacak şekilde seçildiğinde aşağıdaki Landau–Levich tarafından türetilen Denklem 2.5 ile hesaplanır. (Toplan, 2010)

$$h = 0.94 \frac{(\eta U)^2}{\gamma_{LV}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \quad (2.5)$$

- h : filmin kalınlığı
η: sıvının viskozitesi
U : daldırma hızı
γLV : sıvı–buhar yüzey gerilimi
ρ: solün yoğunluğu
g : yerçekimi ivmesi

2.2.2 Döndürerek kaplama yöntemi

Döndürerek kaplama yöntemi taşıyıcının yatay olarak bir eksen etrafında döndürülürken üzerine sol damlatılması ve solün merkezkaç kuvvetiyle taşıyıcı yüzeyine yayılması esasına dayanmaktadır. Döndürerek kaplama yöntemi 5 basamaktan meydana gelmektedir. Damlatma basamağında dönecek yüzeye sabitlenmiş olan taşıyıcı üzerine sol damlatılır. Başlangıçta durmakta olan taşıyıcı döndürülür. Taşıyıcı, mümkün olan en kısa sürede istenilen dönme hızına ulaşmalıdır. Çünkü dönme hızının sabit olması film kalınlığının düzgün olması doğrudan doğruya etkilemektedir. Dönme sırasında taşıyıcı üzerine damlatılmış sol merkezkaç kuvvetinin etkisi ile taşıyıcının tüm yüzeyine yayılır. Eğer sol fazla miktarda damlatılmışsa, fazlalık sol taşıyıcı üzerinden savrulur. Dönme esnasında, filmin kalınlığı yavaş yavaş azalır. Dönme sonunda filmin kalınlığı taşıyıcının yüzeyinde her yerde aynı olur. Ardından buharlaşma aşaması gelir. Taşıyıcı bu işlemden sonra fırınlanır. Şekil 2.4’de döndürme ile kaplama işleminin basamakları gösterilmiştir (Efendiler, 2006).



Şekil 2.4 Sol - Jel döndürme yöntemi ile kaplama (Bardakçı, 2007)

Döndürerek kaplama işlemi ince altlıkların veya ince tabaka gibi malzemelerin kaplanması çalışmalarında kullanılmaktadır (Evcin, 2006). Film kalınlığı ve diğer özellikler kaplama çözeltisinin özelliğine (viskozite, katı oranı, yüzey gerilimi v.b) bağlıdır ve kaplama işlemindeki parametreler kaplama çözeltisinin özelliğine göre seçilir. Son döndürme hızı, hızlandırma, döndürme süresi ve buhar çıkışının bitmesi (uçucu malzemeler için) gibi faktörler filmin özelliklerini ve kalitesini belirler. Döndürme ile kaplamada en önemli faktörlerden birisi tekrarlanabilirliktir. Parametrelerdeki küçük bir değişiklik kaplamada çok fazla değişikliğe neden olabilir (Sayılkan, 2007). Film kalınlığının düzgün olmasını sağlayan iki kuvvet vardır; merkezci kuvvet ve buna ters yönde sürtünme kuvveti.

Döndürme sonunda oluşan film kalınlığı denklem 2.6'daki gibi ifade edilmektedir.

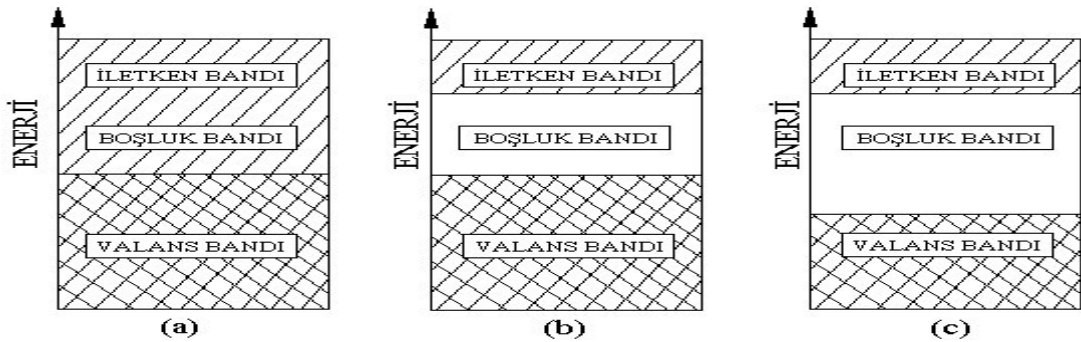
$$h(t) = \frac{h_0}{\sqrt{1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t}{3\eta}}} \quad (2.6)$$

Buradaki $h(t)$; ρ yoğunluğundaki, viskozitesi η olan ve ω açısal hızıyla döndürülen filmin t süre sonraki kalınlığıdır (Bardakçı, 2007).

3. YARI İLETKENLER

Yarı iletken fiziğinin ve teknolojisinin tarihsel gelişimi 19. yüzyılın ikinci yarısında başlamıştır. Yarı iletkenlerin kimyasının ve fiziğinin erken tarihindeki ilginç tartışmalar G. Busch ve Handel tezleriyle başlamıştır. Ardından yarı iletken endüstrisinin tarihi Morris ve Holbrook ve diğerlerinin yazıları ile gelişmeye devam etmiştir. (Grundmann, 2010). 1947’de transistörlerin bulunması elektronik ve fotonik endüstrisini yaratan hızlı gelişim sürecini tetikleyen en önemli unsurdur. Günümüzde yapısında yarı iletken bulunan malzemeleri sıralayacak olursak; bilgisayarlar (ana işlemciler, bellekler), optik depolama araçları (CD ve DVD ler için lazerler), iletişim altyapıları (fiber optik teknolojisinde kullanılan lazerler ve foto detektörler, mobil iletişimde kullanılan yüksek frekanslı elektronik aletler) , ekranlar (ince film transistörler, LED), projeksiyonlar (lazer diyotlar), genel aydınlatmalardır (LED). Bu sebeptendir ki yarı iletken fiziğinin ve ürünlerinin temel bir şekilde araştırılmasının modern kültür ve medeniyetin gelişimine katkıları azımsanmayacak kadardır (Grundmann, 2010).

Bilindiği üzere katılar elektriksel ve optiksel özelliklerine göre iletkenler, yalıtkanlar ve yarı iletkenler olmak üzere üçe ayrılır. Bu sınıflandırma enerji bantları arasındaki farklılıklar temel alınarak yapılmaktadır. Enerji-bant yapılarına bakarak iletkenlerin, yarı iletkenlerin ve yalıtkanların arasındaki farklılık açıklanabilir. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1 : İletkenlik derecesine göre değişen bant enerjileri (a) İletken, (b) Yarı iletken, (c) Yalıtkan (url-1)

Yarı iletkenler, katıların en ilginç ve önemli sınıfını oluşturur. Bunlar metallere uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir olaylar zincirini sergilerler ve geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Yarı iletkenlerin özdirençleri oda sıcaklığında $10^{-2} - 10^9$ ohm-cm aralığına yayılır. Bu aralık; iyi iletkenler (10^{-6} ohm-cm) ve yalıtkanlar ($10^{14} - 10^{20}$ ohm-cm) arasındaki bölgeye düşer. Mutlak sıfır sıcaklığında, yarı iletken maddelerin saf ve mükemmel kristalleri yalıtkan özelliği gösterir (Dikici, 1993).

Bu maddeler düşük sıcaklıkta iletme hiçbir katkıda bulunmazken, sıcaklığın artırılmasıyla özdirençleri azalarak iletme katkıda bulunur (Bahar, 2007).

Bir yarı iletkenin elektriksel iletkenliği, sıcaklığa sıkıca bağlıdır. Sıcaklık yükseltildiğinde, bir yarı iletkenin özdirençinin küçülmesi; onun en belirgin özelliğidir. Bu özellik; özdirenç esas olarak fonon saçılmasından ileri gelen, metallere durumdan tamamen farklıdır. Yarı iletkenlerdeki yabancı madde konsantrasyonu arttıkça özdirenç küçülür. Metallerde ise, yarı iletkenlerin aksine saflık arttıkça özdirenç küçülür. Yarı iletkenler oldukça farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip, büyük sayıdaki cisimleri içine alır. Bu maddeler, elementlerin periyodik cetveldeki konumuna bağlı olarak benzer davranışlı gruplara ayrılırlar. En iyi bilinen yarı iletkenler, periyodik cetvelin IV. Sütunundaki C (elmas), Si, Ge ve alfa-Sn nin oluşturduğu yarı iletkenlerdir. Bunlardan özellikle Si ve Ge üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış ve bunlar elektronik teknolojisinde yaygın kullanım alanları bulmuşlardır. Saf yarı iletkenlerin hepsi elmas yapıda kristalleşir. Elmas yapısı, özdeş iki atomun oluşturduğu bazlı bir fcc (kristal kubik yapısı) yapısıdır. Bu yapıda her atom düzgün dörtyüzlü (tetrahedron) oluşturacak şekilde yerleşen dört atomla çevrilidir.

III.-V. Grup bileşikler, yarı iletkenlerin önemli bir başka sınıfını oluşturur. Bu grubun en iyi bilinenleri GaAs ve InSb dir. Bunlar ZnS yapıda kristalleşirler. Bu yapı, bazı oluşturan iki atomun farklı olması dışında elmas yapısı ile aynıdır. Bu bileşikler polar karaktere sahiptirler. II.-VI. Grup bileşikler yarı iletkenlerine örnek olarak CdS ve ZnS verilebilir. Bunlar ZnS yapıda kristalleşirler (Dikici, 1993).

3.1 n-tipi ve p-tipi Yarı İletkenler

Silikon ve germanyum IV. Grup elementlerindedir ve bağ yapabilen dört balans elektronları bulunur. Silikon kristalinde bir silikon atomunun her bir elektronu, diğer bir silikon atomunun bir elektronu ile kovalent bağ oluşturduğundan hareketsizdir. Buna göre kristal silikonda serbest elektron bulunmaz ve maddenin bir yalıtkan özelliği göstermesi beklenir. Gerçekte ise oda sıcaklığında, bir elektronun serbest kalmasına yetecek kadar ısı çalkalanma vardır, böylece bağlardan kopan bir elektron kristal dokusu içinde dolaşır ve elektriği iletir. Bir elektronun bu şekilde ısı "uyarılması" pozitif yüklü bir bölgenin oluşmasına yol açar, buna "boşluk" denir ve silikon atomunu belirtir. Boşluk da hareketlidir ve kristalin elektrik iletimine yardımcı olur. Boşluğun hareket mekanizması kademelidir; elektronca zayıf bölgeye, komşu silikon atomundan bağlı bir elektron atlar ve kendi yerinde pozitif bir boşluk bırakır. Bıraktığı boşluğa, oradaki atomun yanındaki atomdan yeni bir elektron atlaması ile olay devam eder. Böylece elektron hareketinin ters yönüne doğru boşluk oluşması devam eder. Bu açıklamaya göre, bir yarı iletkenin iletkenliği ısı elektronunun bir yönde, boşlukların ise diğer yöndeki hareketlerinden kaynaklanır.

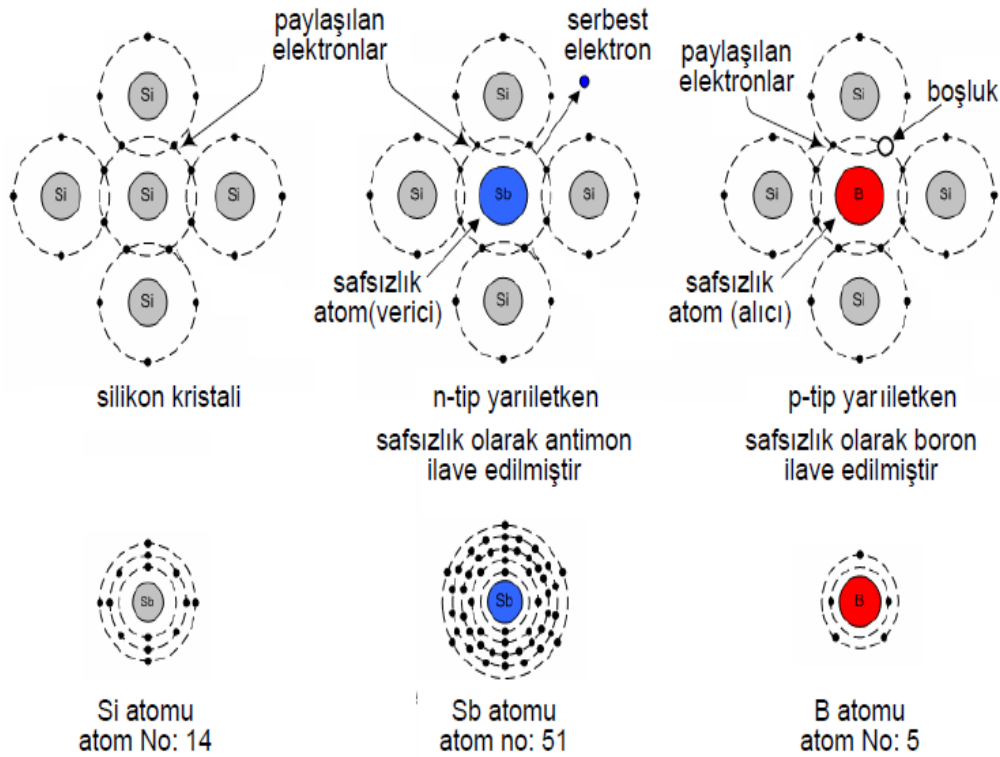
Bir silikon veya germanyum kristalinin iletkenliği "doping" yapılarak çok fazla artırılabilir. Doping, ufak ve miktarı kontrol edilebilen bir safsızlığın kristal yapısına sokulmasıdır. Bir silikon yarı iletkene konulan doping maddesi arsenik veya antimon gibi bir V. grup elementi, veya indiyum veya galyum gibi bir III. grup elementi olabilir.

3.1.1 Donor (Verici) veya n-tip safsızlık

Bir V. grup elementi atomunun kristal örgüsündeki bir silikon atomu ile yer değiştirmesi durumunda, yapıya bir tane bağlı olmayan elektron konulmuş olur; elektronun kristalde dolaşması için çok az bir ısı enerjisi gereksinim vardır. Bu elektronun ayrılmasıyla geride kalan pozitif atom (V. grup elementinin atomu), hareket edebilen bir boşluk görevi yapamaz, çünkü kovalent silikon bağından buradaki bağımsız konuma bir elektronun geçme eğilimi çok azdır. Doping yapılmış bir yarı iletkene, bağlı olmayan elektronlar içerdiğinden "n-tip" veya negatif tip yarı iletken denir, çünkü akımın "başlıca (salt) taşıyıcıları" elektronlardır. Bu tip bir yarı iletkende hala pozitif boşluklar vardır, ancak sayıları elektronların sayılarına kıyasla çok azdır; yani, n-tip bir yarı iletkende boşluklar akımın "azınlık taşıyıcıları" dır.

3.1.2 Akseptör (Alıcı) veya p-tip safsızlık

Silikonun, sadece üç valens elektronu bulunan bir III. grup elementi ile doping yapılması durumunda "p-tip" veya pozitif tip yarı iletken meydana gelir. Safsızlık atomunun boş orbitaline, yanındaki silikon atomlarından elektronların atlamasıyla pozitif boşluklar oluşur. Bu işlemle III. grup atomu pozitif yüklenir. Boşluklar silikon atomundan silikon atomuna geçerek ilerler; böylece, çoğunun taşıyıcısının pozitif olduğu bir akım oluşur. Pozitif boşluklar elektrikçe pozitif yüklüdür (url-2).



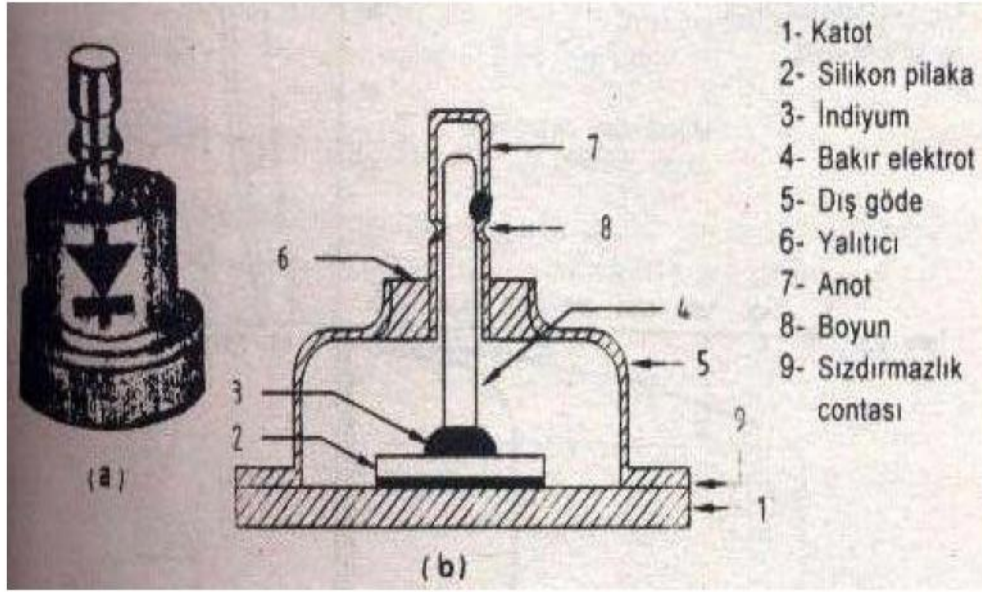
Şekil 3.2 : Saf silikon kristali, verici safsızlık antimon atomu ve alıcı safsızlık bor atomunun yapısını ve yarı iletkenlerin dokusunu gösteren diyagramlar (url-2)

3.2 Diyotlar ve Özellikleri

p ve n tipi iki yarı iletkenin birleştirilmesinden oluşan maddeye "diyot" denir. Diyotlar, yalnızca bir yönde akım geçiren devre elemanıdır. Diğer bir deyimle, bir

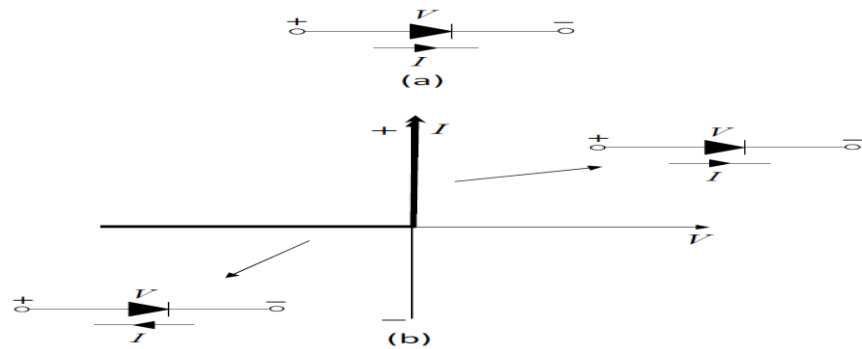
yöndeki dirençleri ihmal edilebilecek kadar küçük, öbür yöndeki dirençleri ise çok büyük olan elemanlardır. Direncin küçük olduğu yöne "doğru yön", büyük olduğu yöne "ters yön" denir.

Yarı iletken diyotları, p ve n tipi germanyum veya Silikon yarı iletken kristallerinin bazı işlemler uygulanarak bir araya getirilmesiyle elde edilen diyotlardır. Hem elektrikte hem de elektronikte kullanılmaktadır. Şekil 3.3'te tipik bir örnek olarak kuvvetli akımda kullanılan bir silikon diyot verilmiştir.



Şekil 3.3 : Tipik bir silikon diyotun ayrıntılı gösterimi (url3)

Elektronik devre elemanı olarak üretilen ilk pn eklemi "diyot" adını almıştır. Diyot, üretilen en basit yarı iletken aygıt olmasıyla birlikte elektronik sistemlerde hayati rol oynamaktadır. Gerek çok basit, gerekse oldukça karmaşık uygulamalarda kullanılan bir aygıttır. İdeal bir diyotun sembolü ve karakteristiği Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



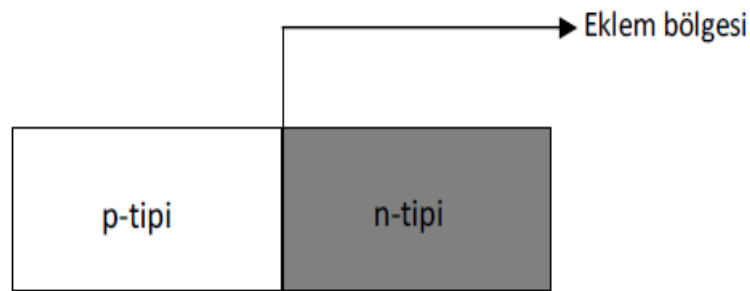
Şekil 3.4 (a) İdeal diyotun sembolü ve (b) ideal diyotun karakteristiği

İdeal bir diyot; üzerinden geçen akımı tek yönlü ileten (sembolde oklar ile tanımlanan yönde) ve açık bir devre gibi davranan, ters yönde akım geçirmeyen bir devre elemanıdır.

Yarı iletken diyot ise n -tipi ve p -tipi yarı iletken malzemelerin basitçe bir araya getirilmesiyle elde edilen bir yapıdır.

pn eklemleri, hem modern elektronik uygulamalarda hem de diğer yarı iletken aygıtları anlamada büyük bir öneme sahiptir. Yarı iletken aygıtların fiziğini anlamada pn eklemleri oldukça fazla bilgi vermektedir. pn eklemlerinin basit akım-voltaj karakteristik teorisi Shockley tarafından kurulmuştur (Shockley, 1950) Bu teori daha sonralarda Sah, Noyce, Shockley (Ebers, 1952) ve Moll (Moll,1956) tarafından geliştirilmiştir.

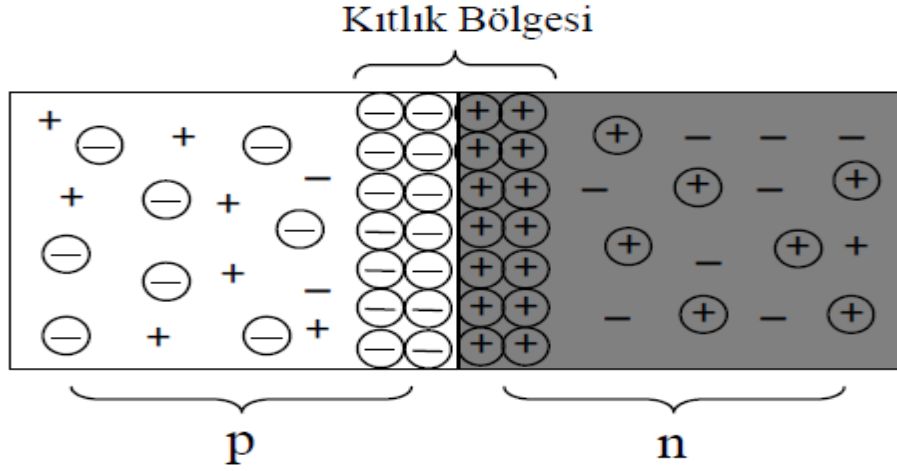
pn eklemi bir p -tipi ve bir n -tipi yarı iletkenin kontak edilmesiyle elde edilir. Eğer n -tipi ve p -tipi bölgeler aynı yarı iletken malzemeden elde edilirse n -tipi silisyum ve p -tipi silisyum) bu tip ekleme “*homoeblem (tek-tür eklem)*” adı verilir. Eğer yarı iletken malzemeler farklı ise (n -tipi silisyum ve p -tipi germaniyum), böyle eklemlere de “*çoklu eklem (çoklu eklem)*” adı verilir. pn ekleminin şematik gösterimi Şekil 3.5’da verilmiştir.



Şekil 3.5 : pn ekleminin şematik gösterimi

Bir p -tipi yarı iletkenle bir n -tipi yarı iletken bir araya getirildiğinde n bölgesinden p bölgesine elektron aktarımı ve p bölgesinden n bölgesine hol aktarımı meydana gelir. Elektronlar n bölgesinden p bölgesine difüzyona uğrarken gerilerinde pozitif yüklü

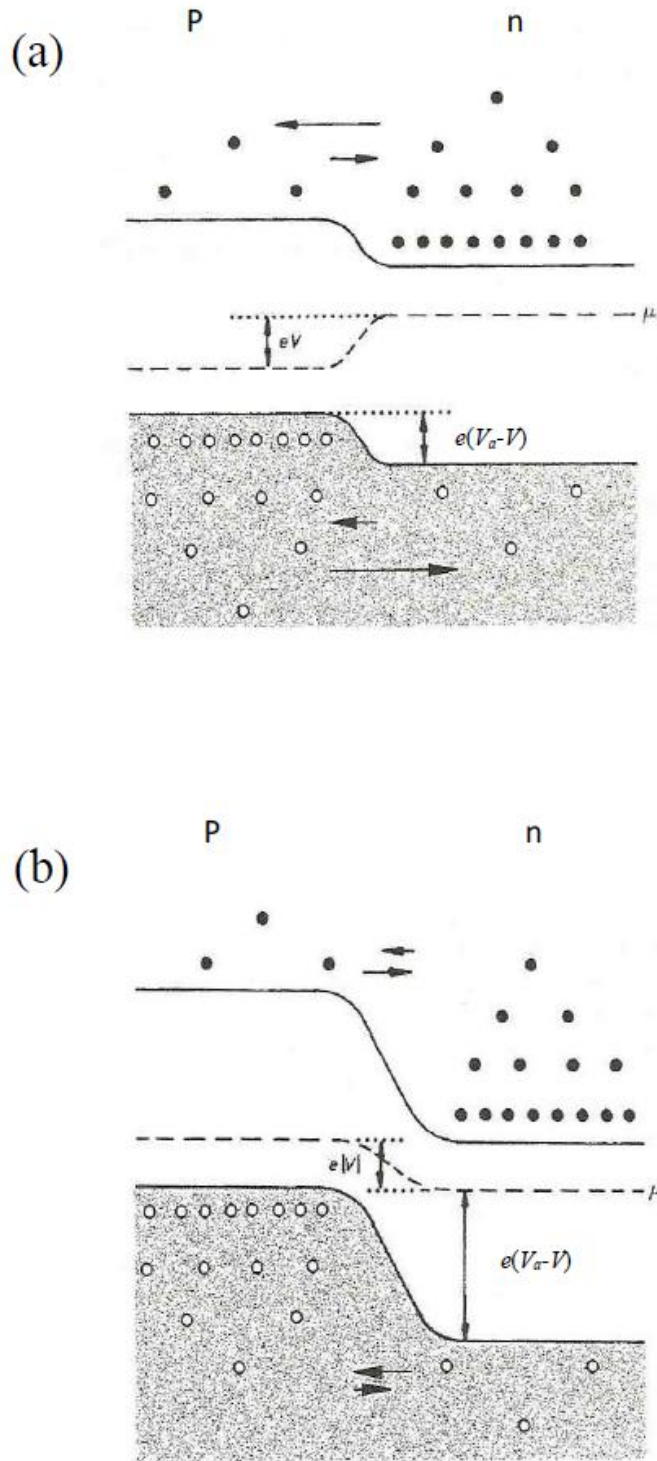
holler bırakılır. Bu hollerin bulunduğu bölgeye “kıtık bölgesi” adı verilir. Çünkü bu bölge elektron yoğunluğu bakımından boştur (Oral, 2012).



Şekil 3.6 : $V=0$ 'da pn eklemde kıtlık bölgesinin oluşumu

Buna benzer şekilde hollerin p bölgesinden n bölgesine difüzyonu sonucu p bölgesinde de bir “kıtık bölgesi” oluşur. Bu bölgedeki taşıyıcıların, bölge dışındaki yerlere göre az olması sebebiyle eklem bölgesinin direnci daha büyüktür. Bu da dışarıdan uygulanan voltajın büyük bir kısmının eklem bölgesinde gözlenmesine sebep olur.

Bir pn eklemine ek bir V potansiyel farkının uygulanması eklem üzerinden bir elektrik akımı geçmesine neden olur. Eğer potansiyelin pozitif tarafı p bölgesi ile birleştirilirse, eklem “ileri besleme” olduğu söylenir ve V pozitif alınır. Eğer pozitif taraf n bölgesi ile birleştirilirse, eklem “ters beslenmiştir” ve V negatiftir. Şekil 3.7’de pn eklemine ileri ve ters beslemedeki elektron ve hol durumları gösterilmiştir. İleri beslemede (Şekil 3.7a) çoğunluk taşıyıcılarının diğer tarafa geçmesine engel olan potansiyel engeli küçülmekte ve çoğunluk taşıyıcılarının geçişi artmaktadır. Bu durum devreden geçen akımın artmasına sebep olur. Ters beslemede ise (Şekil 3.7b) çoğunluk taşıyıcılarının geçmesine engel olan potansiyel engeli daha da artar. Ancak azınlık taşıyıcıları için böyle bir engel söz konusu olmadığından azınlık taşıyıcıları geçişlerine devam ederler. Azınlık taşıyıcılarının yoğunlukları çoğunluk taşıyıcılarına göre daha az olduğu için akım da çok küçük olur. Ters besleme durumunda diyot çok yüksek bir direnç göstermektedir (Oral, 2012).



Şekil 3.7. (a) İleri beslemeli ve (b) geri beslemeli pn ekleminin enerji bant diyagramı.

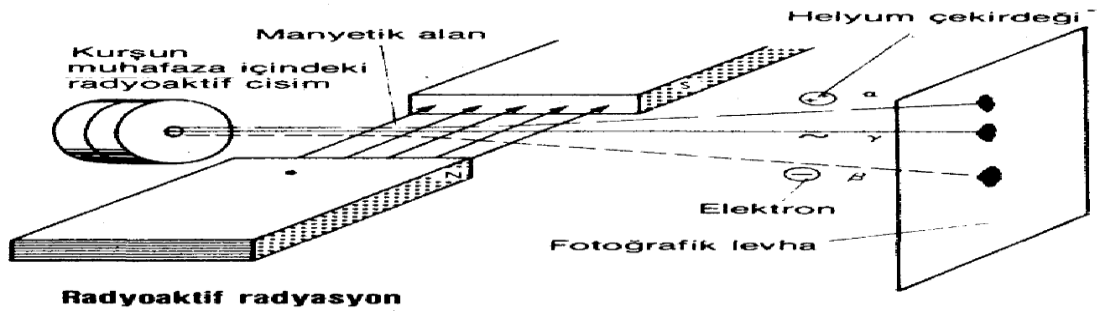
4. RADYASYONUN MALZEME ÜZERİNE ETKİSİ

4.1. Radyoaktivite ve Radyasyon Tipleri

4.1.2 Radyoaktivitenin keşfi

1896 yılında Henri Becquerel doğal floresan minerallerini Wilhelm Roentgen tarafından keşfedilen X ışınlarının özelliklerini çalışmak için kullanıyordu. Potasyum uranil sülfatı güneş ışığına maruz bırakıp ardından bu tozları kara bir kağıda sarılı biçimde fotoşekil plakaların üstüne koymuştur. Becquerel bunu yaparken uranyumun güneş ışığının soğurup daha sonra X ışını olarak yayımladığına inanıyordu. Ancak bu hipotezi 25-26 Şubat'ta Paris'teki kapalı havadan ötürü başarılı olamadı ve aksi kanıtlandı. Nedendir bilinmez Becquerel fotoşekil plakalarını geliştirmeye karar verdi. Görüntüler Becquerel'i şaşırtacak derecede güçlü ve netti ve uranyumun dış herhangi bir kaynağa ihtiyaç duymaksızın, güneş gibi, radyasyon yaydığını kanıtlıyordu. Becquerel bu deneyi ile radyoaktiviteyi keşfetmiştir.

X ışınları yüksüz ve manyetik alan ile bükülemez. Yeni radyasyon tipi ise manyetik alan ile bükülebildiğine göre yüklü ve X ışınlarından farklı olmalıydı. Farklı radyoaktif malzemeler manyetik alana tabi tutulduğunda başka yönlere sapıyor ya da yönünü değiştirmeden yayılıyordu. Bu da radyoaktivitenin elektriksel olarak negatif, pozitif ve yüksüz olduğuna işaretledi. Aşağıda Şekil 4.1'de radyasyonun manyetik alan etkisi altındaki davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Radyasyonun manyetik alan içerisindeki davranışı

Radyoaktivite terimi aslında Marie Curie ve eşi Pierre Curie, Becquerel'in henüz keşfettiği olguyu araştırmaya başladıklarında ortaya çıkmıştır. Curie'ler maden cevherinden uranyumu çıkarmaya çalışırken şans eseri arta kalan cevherin başlangıçtaki uranyumdan daha fazla aktif olduğunu keşfetmişlerdir. Curie'ler bu gözlem ile uranyum cevherinin başka radyoaktif elementler içerdiğinin sonucuna varmışlardır. Bu olay polonyum ve radyum elementlerin keşfine sebep olmuştur.

Ernest Rutherford da radyoaktif bozunma üstüne birçok deney yapmıştır. Bu deneyler sonucunda alfa, beta ve gama parçacıklarını bulmuştur ve maddeye nüfuz etme becerilerine göre sınıflandırmıştır. Rutherford, Becquerel'in kullandığı düzeneğe benzer bir düzenek kullanmıştır. Haznedeki hava kaldırıldığında alfa kaynağı fotoşekil plaka üzerinde bir nokta oluştururken hava tekrar eklendiğinde noktanın kaybolduğunu gözlemlemiştir. Yani alfa radyasyonunu durdurmak için yalnızca birkaç santimetre hava yeterlidir.

Alfa parçacıkları daha fazla elektriksel yük taşıdığından beta ve gama parçacıklarına kıyasla daha ağır ve yavaş hareket eder. Malzeme ile etkileşimi ise diğerlerine oranla daha kolaydır. Beta parçacıkları daha hafif olduklarından daha hızlı hareket ederler. 1 mm kalınlığında alüminyum levha veya birkaç metre hava beta etkileşiminden çıkan elektronları ve pozitronları durdurur. Gama ışınları ise elektriksel olarak yüksüz olduğundan malzemelerin içinde uzun mesafeler boyunca nüfuz edebilir. Gama ışınlarının durdurmak için birkaç cm kurşun veya bir metre beton yeterlidir (CPEP, 2003).

Radyoaktivite dolaylı olarak da radyasyonun tarihsel süreci bu şekilde başlamıştır. Her yeni keşif daha sonraki keşiflere ön ayak olmuştur.

4.1.2 Radyoaktivite

Radyoaktiflik, bazı maddelerin kendi kendine bozularak daha küçük parçalara ayrılması ve bu olay sonucunda ortama ışın yayması olayıdır. En ağır kararlı element ${}_{83}\text{Bi}^{207}$ olup daha ağır izotoplar dışarıya verecekleri fazla enerjileri olduklarından kararsızdır. Bu izotoplar kararlı hale gelene dek enerji fazlalıklarını bazı ışınlar yayınlayarak giderirler. Bu olaya “**radyoaktivite**” veya “**radyoaktif parçalanma** veya **bozunum**” denmektedir.

Radyoaktivite tamamen rastlantısal bir olgudur. Çekirdeğin ne zaman bozunacağını önceden bilmek imkânsızdır. Genel olarak atom numarası 82'den büyük olan doğal elementlerin hepsi radyoaktiftir (Tuğrul, 2012)

Radyoaktivite doğal ve yapay olmak üzere iki şekildedir. Tabiatta bulunan izotoplardan 66 tanesi kararsız olup radyasyon salarlar. Bunlara doğal radyoaktif izotoplar ve radyasyon salmalarına da “doğal radyoaktivite” denir. Bunlar dört grupta toplanır. Radyum grubu, Aktinyum serisi, Toryum serisi ve Neptünyum serisidir.

Kararlı izotoplar da; nötronlar, yüklü parçacıklar veya fotonlarla bombardıman edilerek aktif hale getirilebilir. Bu olaya da yapay radyoaktivite denir. Halen yapay olarak üretilen izotop sayısı, 1170 kadardır.

Önceki sayfalarda da bahsettiğimiz gibi radyoaktif cisimlerin bozunarak aktivitelerini kaybetmelerine radyoaktif parçalanma denir. Bilindiği üzere her radyoaktif çekirdeğin bozunumu farklı şekildedir. Bu özellik bozunum sabiti ile belirlenir.

Aktivite, birim zamanda bozunma veya parçalanmadır.

$$A = \lambda N \quad (4.1)$$

Eğer bir t anında N tane radyoaktif çekirdek varsa ve numuneye yeni bir çekirdek ilave edilmiyorsa dt zaman aralığında bozunan dN çekirdek sayısı N ile orantılıdır.

Aktiflik (A):

$$A = -\left(\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N \quad (4.2)$$

Bu durumda;

$$-\left(\frac{dN}{dt}\right) = \lambda N \quad (4.3)$$

Düzenlenirse;

$$\left(\frac{dN}{N}\right) = -\lambda dt \quad (4.4)$$

Her iki tarafın integrali alınır;

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (4.5)$$

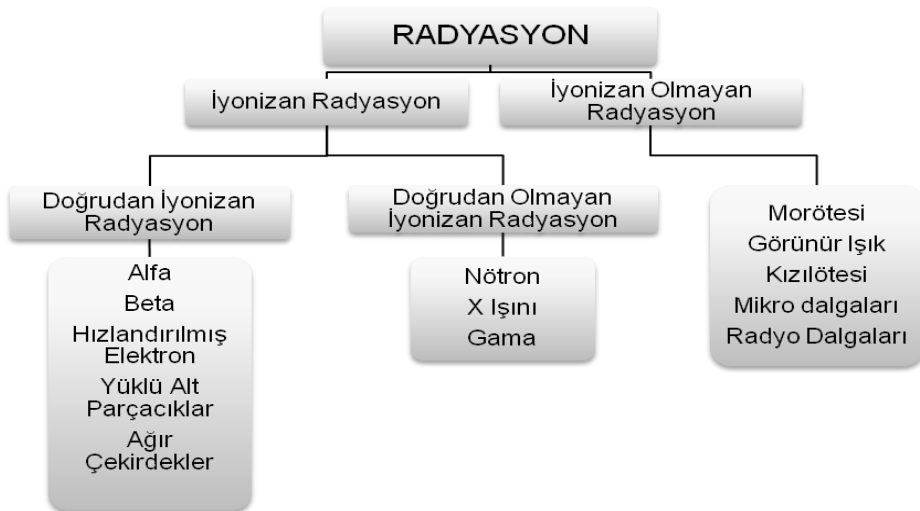
denklemleri ile ifade edilir. Bu denklem herhangi bir t anında mevcut radyoaktif atomların sayısını gösterir. Burada N_0 başlangıçta, yani $t=0$ anında mevcut toplam çekirdek sayısını, λ ise parçalanma sabitini ifade etmektedir.

Radyoaktif parçalanma olayının hızı; birim zaman içinde bozulmaya uğrayan radyoaktif çekirdeklerin mevcut toplam radyoaktif çekirdeklere oranlanması ile bulunabilir. Burada ulaşılan sabit değere “Bozulma Sabiti” veya “Parçalanma Sabiti” denilip λ ile gösterilir. Radyoaktif maddeler bu denkleme göre bozunuma uğrar (Görür, 2006).

Radyoaktivitenin keşfi bölümünde de anlatıldığı gibi radyoaktif ışınların tatbik edilen manyetik alan içindeki davranışları göre üç çeşit oldukları gözlemlenmiştir. Radyoaktif çekirdekler fazla enerjilerini alfa, beta ve gama ışınları ile ortama atarlar. Radyoaktif bozunma daha çok beta ışınması şeklinde olmaktadır.(Tuğrul, 2012)

4.1.3 Radyasyon tipleri

Radyasyon parçacık akımıyla veya dalga tabiatına uygun olarak bir maddeye veya ortama enerji aktarımı olarak tanımlanabilir. Radyasyonu enerjisine göre Şekil 4.2’deki gibi sınıflandırabiliriz.



Şekil 4.2 : Radyasyonun enerjisine göre sınıflandırılması (Tuğrul, 2012)

Radyasyonu Şekil 4.2’de de görüldüğü üzere önce iki kategoriye ayırabiliriz: İyonizan olan ve iyonizan olmayan radyasyon. Bu adlandırma radyasyonun etkilediği maddeyi iyonize etme yeteneğine bakarak yapılır. İyonizasyon enerjisi, bir atomu iyonize etmek yani bağlı olduğu çekirdekten koparmak için gerekli olan minimum enerjidir. İyonizan radyasyon adından da anlaşılacağı üzere etkileştiği maddeyi iyonize eden radyasyon biçimidir. İyonizan radyasyon kendi içinde doğrudan ve doğrudan olmayan iyonizan radyasyon olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Doğrudan iyonizan radyasyon kısmına alfa, beta, hızlandırılmış elektronlar, yüklü alt parçacıklar ve ağır çekirdekleri koyabiliriz. Doğrudan iyonizan olmayan radyasyon çeşitleri ise nötronlar, X ışınları ve gama ışınlarıdır.

İyonizan olmayan radyasyon ise etkileştiği maddeyi iyonize etmeyen radyasyon çeşididir. Yani enerjisi etkileştiği maddenin atomlarının veya moleküllerinin iyonizasyon enerjisinden küçük olduğunda iyonize edemez. İyonizan olmayan radyasyon terimi soğrulan maddenin molekülünü veya atomunu iyonize edemeyecek kadar enerjiye sahip olan tüm elektromanyetik radyasyon türleri için geçerlidir. Morötesi ışınlar, görünür ışık, kızılötesi ışınlar, mikro dalgalar ve radyo dalgaları bu sınıfa girmektedir.

Doğrudan iyonlaştırıcı radyasyona neden olan bozunumları alfa bozunumu, beta bozunumu, elektron yakalama olarak belirtebiliriz.

4.1.3.1 Alfa bozunumu

Alfa bozunumu bir nükleer dönüşümdür. Bu dönüşüm sonucunda enerjitik bir alfa parçacığı (He-4) etrafa atılır. Ebeveyn nüklüdün atom numarası Z, 2 azalır. Kütle numarası ise 4 azalır. Alfa parçacığının enerjisi bozunma sonucunda dışarıya atılan kinetik enerjiden küçük ise fazla enerji ortama bırakılır. Bu fazla enerji bir veya daha fazla gama ışını olacak şekilde ortama salınır. Bu hemen hemen alfa bozunumu ile eşzamanlı olarak gerçekleşir. (Tuğrul, 2012)βα

Alfa bozunum örneği, Ra-226;



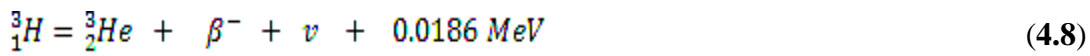
4.1.3.2 Beta (β^-) bozunumu

Beta negatronu bozunumu genelde çekirdekte fazla nötron olduğunda çekirdeğin kararlı hale geçmek üzere başvurduğu bir bozunumdur. Beta bozunumu süresince ebeveyn çekirdekteki bir nötrona bir proton, elektron ve nötrinoya dönüşür.



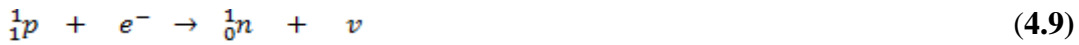
Proton çekirdekte kalır. Elektron, atomu yüksek hızla beta parçacığı olarak terk eder. Beta parçacığı yüklü bir parçacık olduğundan etraftaki malzemelerle etkileşime girerek enerjisini bırakır. Nötrino, elektronun aksine yüksüz ve neredeyse kütesizdir.

Beta bozunum örneği olarak H-3 verilebilir:



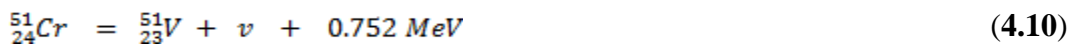
4.1.3.3 Elektron yakalama

Bir atomda çok fazla proton olduğundan çekirdek kararlı hale geçmek için bu protonlardan biri iç kabuk elektronu ile birleşir. Bu sürece elektron yakalama denmektedir. Bu olayın sonucunda bir proton ve bir elektron nötrona dönüşür.



Denklemden 4.9'da görüldüğü üzere elektron yakalama ebeveyn çekirdeğin atom numarasını 1 düşürerek reaksiyon sonunda ebeveyn ve kız çekirdeğin kütle numaraları eşitlenmiş olur. Elektron yakalama sonucunda oluşan boşluk doldurulmalıdır. Yüksek enerji seviyesindeki kabuktan bir elektron iç kabuğa gelerek oluşan boşluğu doldurur. Bu esnada X ışını ortama verilir. Bu olay sonucunda oluşan elektron boşluğu ise dış kabuktan bir elektron ile doldurulur. Bu olay en düşük enerjili kabuk dolana kadar devam eder. Bu süreç boyunca ortama X ışını verilir. Eğer bozunma enerjisinin tamamı, nötrinoya aktarılmadığında gama ışınları da yayınlanabilir.

Elektron yakalama örneği olarak, Cr-51:



4.1.3.4 Pozitron (β^+) yayılımı

Çekirdekte çok proton ve var olan bozunma enerjisi büyük olduğunda çekirdek elektron yakalama yerine pozitron yayılımı yaparak kararlı hale gelmeye çalışabilir. Pozitron yayılımı bazen beta (+) bozunumu olarak da adlandırılır. Bu bozunum beta

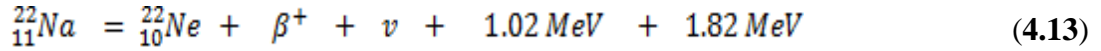
(-) bozunumu ile birbirine benzerdir. Tek farkı elektron yerine ortama pozitron salmasıdır. Pozitron yayılımı sırasında çekirdekdeki protonlardan biri nötron, pozitron ve nötrinoya dönüşür.



Pozitron elektron aynı kütleye sahip olup zıt yüklüdür. Yayınlanan pozitron ortamda hareket eder etraftaki diğer atomlarla etkileşerek yavaşlar. Yavaşladıktan sonra en yakınındaki elektron ile birleşerek anihilasyon (madde-antimadde) reaksiyonunu gerçekleştirir. Bu anihilasyon reaksiyonunda elektron ve pozitronun çarpışması sonucunda 2 gama ışını veya fotonlar ortama salınır. Her bir fotonun enerjisi 0.511 MeV'dir ve zıt yönlerde yayımlanırlar.

Pozitron yayımlayıcıları nadir kullanılırlar. Çünkü üretimi pek pratik değildir. Pozitron yayan izotopların yarı ömürleri genelde çok uzun değildir. Parçacık hızlandırıcılarda (siklotron) üretilirler. En çok kullanıldığı yer PET (Pozitron Emisyon Tomografisi) cihazlarıdır. PET cihazları beyin tümörlerini ve diğer beyin hastalıkları ile yumuşak doku incelemelerini tetkik etmekte kullanılır.

Pozitron yayılım örneği, Na-22:



Yukarıdaki bozunma türlerine ek olarak iç dönüşüm ve iç geçiş yaparak bazı izotoplar kararlı hale gelmektedir. Bu bozunumlarda dışarıya X ışını veya gama ışını yaymaktadır (UW Environmental Health and Safety, 2006)

4.2. Radyasyonun Malzemeyi Etkileme Mekanizmaları

Radyasyonun madde ile etkileşme mekanizması radyasyonun tipine göre değişir. Bunu şu şekilde ayırabiliriz. Elektriksel olarak yüklü parçacıklar girdiği ortamı doğrudan iyonize ederler. Nötr parçacıklar ise doğrudan olmayan iyonizasyona neden olarak ikincil radyasyon oluştururlar. Direkt iyonizan parçacıklarda kendi içinde ağır parçacıklar (pionlar, protonlar, döteronlar ve alfa parçacıkları) ve hafif ağır parçacıklar (elektronlar ve pozitronlar) diye sınıflandırılır. Nötr parçacıklar ise fotonlar ve nötronlar diye iki sınıfa ayırabiliriz. (Şahin, 2010)

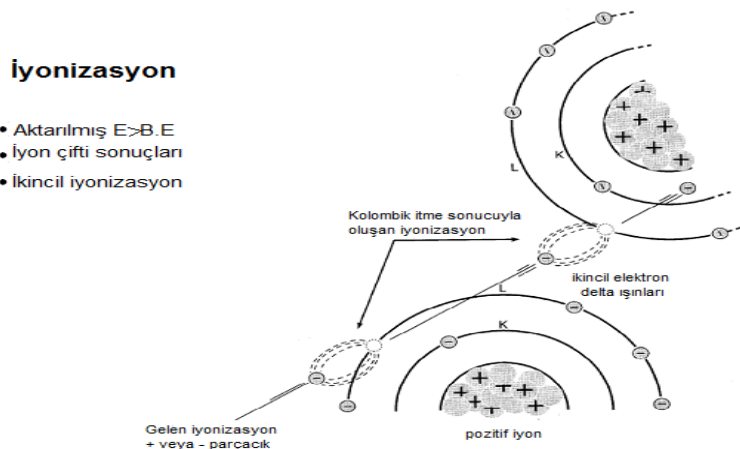
4.2.1 Yüklü parçacıklar

Yüklü parçacıkların enerjileri, madde tarafından ne kadar soğurulduğunun ölçülmesiyle tayin edilebilir. Genel olarak, yüklü parçacıklar madde içerisinde geçerken enerji kaybı ve geliş doğrultularından sapmaları gibi iki ana özelliklerle karakterize edilirler. Bu etkiler öncelikle maddenin atomik elektronları ile elastik olmayan çarpışması ve çekirdekten elastik saçılmasının sonucudur (Şahin, 2010). Bu reaksiyonlar maddede birim uzunluk başına birçok defa meydana gelir. Fakat bunlar sadece meydana gelen reaksiyonlar değildir. Cherenkov radyasyon yayınlanması, nükleer reaksiyonlar, transfer radyasyonu ve Bremsstrahlung diğer olabilecek etkileşme mekanizmalarıdır.

Yüklü parçacıkların madde ile etkileşimini incelerken yüklü parçacıkları hafif yüklü parçacıklar (e^- , e^+) ve ağır yüklü parçacıklar (muon, pion, proton, alfa ve diğer ağır çekirdekler) diye iki gruba ayırmak gereklidir (Şahin, 2010).

4.2.1.1 Ağır yüklü parçacıklar

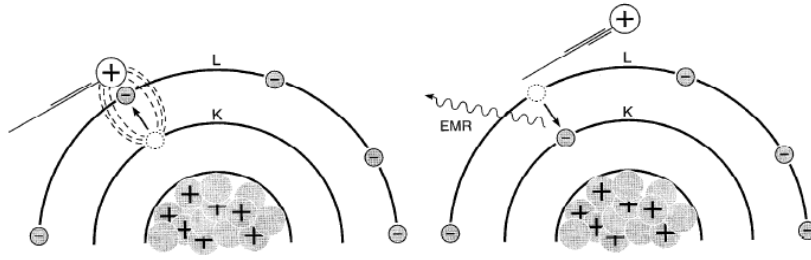
Muonlar, pionlar, protonlar, döteronlar ve alfalar gibi ağır yüklü bir parçacıklar soğurucu bir ortama girdiğinde, ortamdaki atomların yörünge elektronlarının negatif yükü ile kendi pozitif yükleri arasında Coulomb kuvveti ile etkileşir. Ağır yüklü parçacıkların madde içerisindeki enerji kaybından elastik olmayan çarpışmalar sorumludur. Bu etkileşmelerde gelen parçacığın kinetik enerjisi atomun iyonlaşma enerjisinden yeterince büyük ise, enerjisini yolu üzerindeki atomları iyonlaştırmak için maddeye aktarır.



Şekil 4.3 : Atomun yüklü bir parçacıkla iyonizasyonu (Şahin, 2010)

Yüklü bir parçacık madde içerisinde bir uçtan diğer uca geçerken, elektronlar ile çarpışmalar sonucunda enerjisinin çoğunu kaybeder. Her bir etkileşimde kaybedilen enerji çok küçük olacaktır. Bu enerji, toplam enerjinin sadece küçük bir kısmına karşılık geleceğinden, gelen parçacık madde içerisinde bunun gibi birçok etkileşime yapacaktır. Yani, bu etkileşimler sonucunda binlerce iyon çifti meydana gelecektir. Soğurucu ortamın atomundan kopan elektron negatif iyonu, geriye kalan atom da pozitif iyonu meydana getirecektir. Meydana gelen negatif iyon (e^-) tekrar ikincil bir iyonlaşmaya sebep olabilir, bu elektronlar delta-ışınları olarak da bilinir. Ağır yüklü parçacıkların atomik elektronlarla çarpışmaları yollarında herhangi bir sapmaya neden olmaz, yol aşağı yukarı bir doğrudur. Bu sebeple, yüklü parçacıklar verilen bir soğurucu madde içinde belirli bir menzile karakterize edilirler. Menzile, parçacıkların madde içerisinde duruncaya kadar aldıkları yol olarak tanımlanır.

Yüklü parçacığın madde ile etkileşim mekanizması olan iyonlaşmanın yanı sıra bir diğer mekanizma elektronların uyarılmasıdır. Gelen ağır yüklü parçacık iyonizasyon enerjisinden daha büyük enerjiye sahip değilse, bu durum gerçekleşir. Soğurucu maddenin atom veya molekülü gelen parçacığın enerjisinin bir kısmını soğurarak daha yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Soğurucu maddeye bağlı olarak uyarılmış atom ya da molekül sonradan görünür bölgede foton ışını yayımlayarak taban durumuna veya daha düşük enerji seviyesine döner. (Şekil 4.4) (Şahin, 2010).

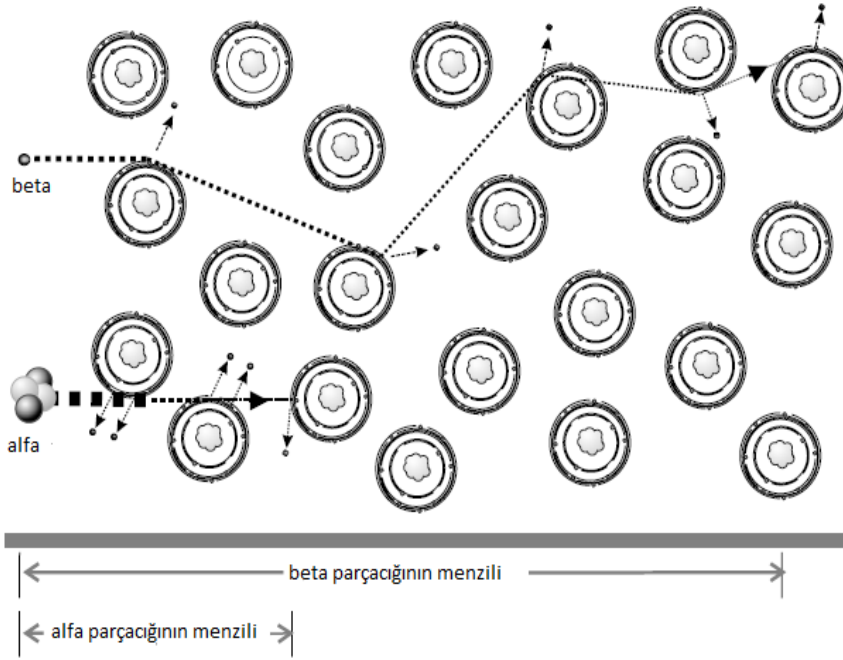


Şekil 4.4 : Atomun uyarılması (Şahin, 2010)

4.2.1.2 Hafif yüklü parçacıklar

Elektronların ve beta (-) parçacıklarının madde ile etkileşimleri ağır yüklü parçacıklar ile neredeyse aynıdır. Beta (-) parçacıklarının madde ile etkileşmesi ağır yüklü parçacıklarda olduğu gibi iyonlaşma ve uyarılmanın yanı sıra ortamdaki çekirdeğin elektrik alanından kaynaklıdır.

Elektron ve pozitronlar elektrik yükü olarak birbirlerinin tersi elektrik yüklüdür. Hızları yani enerjileri yüksek olan beta (-) parçacıkları bir çekirdek alanından geçtiği zaman, radyasyon yolu ile bir enerji kaybına uğrar. Bu enerji Bremsstrahlung ya da frenleme radyasyonu denilen sürekli X ışını spektrumu şeklinde görülür. Bu radyasyon elektronun ivmelenmesinden dolayı ortaya çıkar ve çekirdeğin elektriksel çekimi yüzünden izlediği düz yolda saptmaya neden olur. Enerjisi birkaç MeV veya daha düşük ise bu radyasyonun enerji kaybı düşük olacaktır. Bu nedenle, beta parçacıkları enerjilerinin büyük bir kısmını ortamın yörünge elektronları ile çarpışmaya ya da Moller ve Bhabha saçılmasıyla kaybedecektir. Bu çarpışmaların sonucunda parçacığın izlediği yörünge zikzaklı olacaktır. Yani beta parçacıklarının yolları ağır yüklü parçacıkların yolları gibi düz olmayacaktır. Bu nedenle beta parçacıklarının madde içerisindeki menzili daha uzundur. Şekil 4.5 beta parçacıklarının madde içindeki izlediği yolu göstermektedir (Şahin, 2010)



Şekil 4.5 : Alfa ve beta parçacıklarının menzili

4.2.2 Yüksüz parçacıklar

Yüksüz parçacıklar (fotonlar, nötronlar, nötrinolar) madde ile etkileştiklerinde ikincil radyasyon kaynaklı doğrudan olmayan iyonizasyona neden olurlar. Örneğin; fotonlar Compton saçılması, fotoelektrik olay ve çift oluşum sonucu açığa çıkan elektronlara

aktarılan enerji ile algılanır. Nötronların algılanması ise ikincil olarak açığa çıkan ağır yüklü parçacıkların saptanmasıyla olur (Leroy, 2010).

4.2.2.1 Fotonlar

i) Fotoelektrik olay: Fotonlar hedef atomlarının iç yörünge elektronları ile etkileşime girer ve enerjileri bağlanma enerjilerinden büyükse yörüngeden elektron fırlatılır. Foton tamamen kaybolur ve enerjisi;

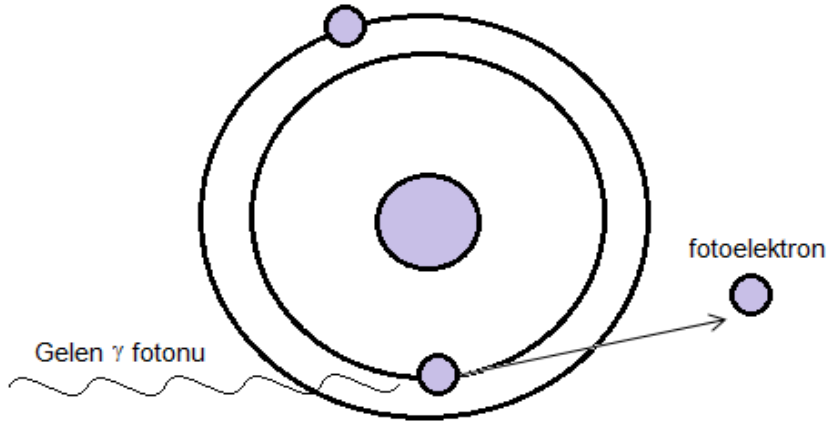
$$E_e = E_\gamma - BE_e, \quad (4.14)$$

E_e : fotoelektronun enerjisini,

E_γ : soğurulan gama ışınının enerjisini,

BE_e : atomik elektronun bağlanma enerjisi

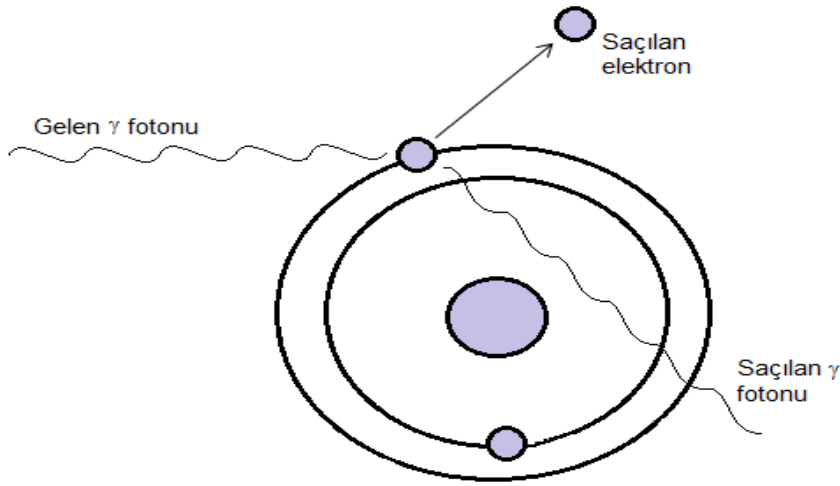
olan bir elektrona dönüşür. Fotoelektronun atılmasının ardından daha dış yörüngedeki bir diğer elektron boşluk bulunan yörüngeye geçer ve bu geçişten karakteristik X ışınları yayınlanır. Bu ışınların enerjisi, gelen gama ışınmasının enerjisi ile karşılaştırıldığında düşük enerjilidirler. X ışını fotonunun atılması, sık sık yörünge elektronunun, Auger elektronunun atılmasına neden olur (Akcan, 2013).



Şekil 4.6 : Fotoelektrik olayın şematik gösterimi

Fotoelektrik olay enerjileri 1 keV ile birkaç yüz keV arasındaki fotonların madde ile etkileşmesinde en baskın olan mekanizmadır. Bunlara örnek olarak medikal ve diş incelemeleri için kullanılan X ışınları, hava alanlarında kullanılan dedektörler gösterilebilir.

ii) Compton saçılması:



Şekil 4.7 : Compton saçılmasının şematik gösterimi.

Çarpışmada momentum ve enerji korunur, gelen foton enerjisinin bir kısmı elektrona aktarılır ve foton geliş yolundan sapar. Gelen foton enerjisi ile saçılan fotonun enerjisi arasında

$$E' = \frac{0,51}{1 - \cos\theta - \frac{0,51}{E}} \quad (4.16)$$

bağıntısı vardır (Bilge ve Tuğrul, 1990). Bu denklemden;

E' : saçılan foton enerjisini

E : gelen foton enerjisini

θ : fotonun saçılma açısını temsil etmektedir.

Eğer saçılma açısı çok küçükse “ $\cos\theta$ ” ifadesi 1'e çok yakın olacaktır ve saçılan foton enerjisi yaklaşık olarak birbirlerine eşit olur. Bu da gelen fotonun enerjisindeki değişiminin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu anlamına gelir. Diğer taraftan saçılma büyük olduğunda ($\sim 90^\circ$) saçılma enerjisi denklemini

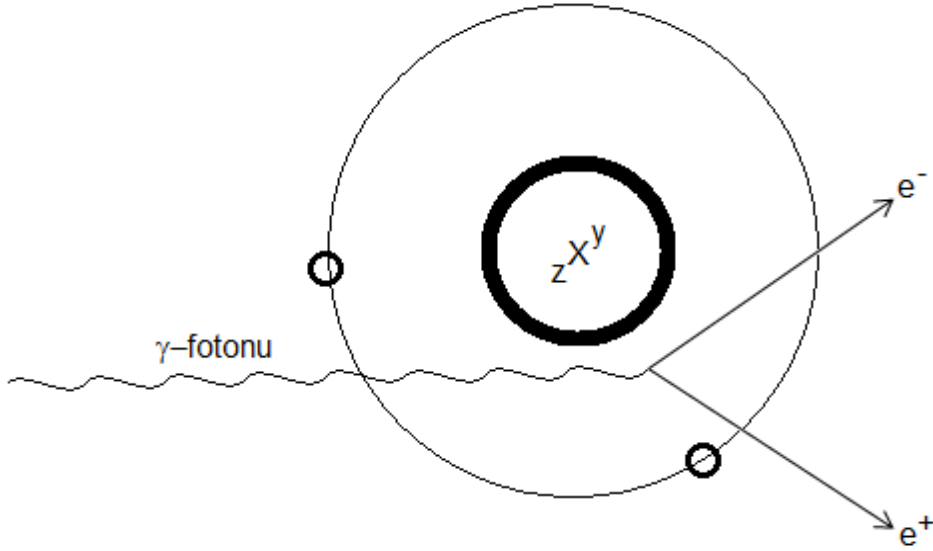
$$E' = \frac{0,51E}{E - 0,51} \quad (4.17)$$

halini alır. Bu denkleme göre saçılan fotonun enerjisi 0.51 MeV'den daha büyük olamaz (Bilge ve Tuğrul, 1990).

Compton saçılması foton ile elektron arasında olduğundan oluşumu atomun elektronlarının sayısına, yani atom numarasına bağlıdır. Saçılan foton ortamdaki

kaçamaz ve daha düşük enerjili olduğundan ortamda fotoelektrik etkileşme yapmaya başlar(Akcan, 2013).

iii) Çift oluşumu: Enerjisi 1.02 MeV'tan fazla olan gama fotonu atom çekirdeğinin yanından geçerse, foton kuvvetli elektrik alanında yok edilir, elektron ve pozitron çifti oluşur (Şekil 4.8) (Bilge ve Tuğrul, 1990).



Şekil 4.8: Çift oluşumunun şematik gösterimi

Elektron ve pozitronun toplam kütlelerinin eş değer enerjisi 1.02 MeV olduğundan, parçacık çiftini oluşturmak için gerekli minimum enerji 1.02 MeV olması gerekir. Gama enerjisi bu değer in üstünde olduğu zaman bu enerji genellikle elektronun ve pozitronun kinetik enerjisi olarak görülür, az bir kısmı da atom çekirdeğine aktarılır. Gama fotonunun enerjisinin artmasıyla fotoelektrik etki ve compton saçılması gibi olayların olma olasılığı azalır, çift oluşumu olasılığı artar. Tıpkı fotoelektrik olayda olduğu gibi çift oluşumu sonucunda da gelen foton soğurulur. Oluşan elektron ve pozitronlar bir birlerini yok ederler ve anhilasyon ışınması verirler (Bilge ve Tuğrul, 1990).

4.3 Nötronların Malzeme ile Etkileme Mekanizmaları

Enerjistik bir nötronun malzeme boyunca ilerlemesi aynı enerjiye sahip diğer nükleer parçacıklara (alfa parçacıkları, negatronlar, pozitronlar, protonlar veya elektronlar) kıyasla çok çok daha kolaydır. Diğer yüklü nükleer parçacıklara kıyasla nötronların

herhangi bir yükü olmadığından atomik elektronların oluşturduğu setten kolayca geçerek atom çekirdekleri ile çarpışır ve bu çarpışma sonucunda etrafa saçılır ya da bir atom çekirdeği tarafından yakalanır. Nötronların çekirdek ile çarpışması sonucunda etrafa nötron saçılımı ve momentumun korunduğu (elastik saçılma) geritepki çekirdeği saçılımı ya da nötronun kinetik enerjisini kaybetmesi (elastik olmayan saçılma) sonucu oluşur ve gama ışını yayınlanır (Şahin, 2010). Bir atom tarafından nötronun yakalanması çekirdekten başka nükleer parçacıkların salınımına veya çekirdeğin ikiye bölünmesine (fizyon) sebep olabilir. Aşağıdaki alt başlıklarda nötron madde etkileşimleri daha kapsamlı olarak açıklanacaktır.

4.3.1 Elastik saçılma

Nötronun atom çekirdeği ile çarpıştıktan sonra elastik olarak saçılımı bir bilardo topunun başka bir bilardo topuna çarpması gibidir. Bir parçacığın sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı diğerine aktarılır. Bu süreçte toplam kinetik enerji korunmaktadır. Başka bir deyişle, nötronun kinetik enerjisinin bir kısmı çarpışma ile beraber çekirdeğe aktarılır ve saçılan nötronun ve geritepki çekirdeğinin kinetik enerjileri toplamı başlangıçtaki nötronun kinetik enerjisine eşittir. Nötronun madde ile bu şekilde etkileşmesi sonucu ortama saçılmış nötron ve geritepki çekirdeği atılır. Elastik saçılma, hızlı nötronların enerjilerini düşük atom numaralı çekirdekler (normal sudaki H, parafin, ağır sudaki döteryum ^2H ve grafitteki ^{12}C) ile etkileşerek kaybetmesinde karşımıza çıkan yaygın bir mekanizmadır. Eş veya benzer kütleli parçacıkların çarpıştığında neler olabileceğini canlandırmak kolaydır. Bu olay sonucunda enerji transferi ve saçılımı olur ve başka ikincil etkiler yoktur. Tıpkı iki bilardo topunun çarpışması gibidir.

Nötron saçılımı, hızlı nötronları düşük atom numaralı çekirdekle çarpıştırarak yavaşlamasını sağlamak için kullanılan başlıca mekanizmadır. Nötron çekirdek ile çarpıştığında neler olduğunu Şekil 4.9'a bakarak kafamızda canlandırabiliriz. Şekil 4.9 belli bir enerji ile gelen nötronun hareket yönünü göstermektedir. Nötron çekirdek ile çarpışır. Saçılan nötron, gelen nötronun hareket yönü ile α açısı yapacak şekilde saçılırken çekirdek β açısı yaparak yoluna devam eden geritepki çekirdeği olarak resmedilmiştir. Bu çarpışma sonucunda nötron tarafından kaybedilen kinetik enerji (E_K) eşitliği Denklem 4.18'deki gibidir.

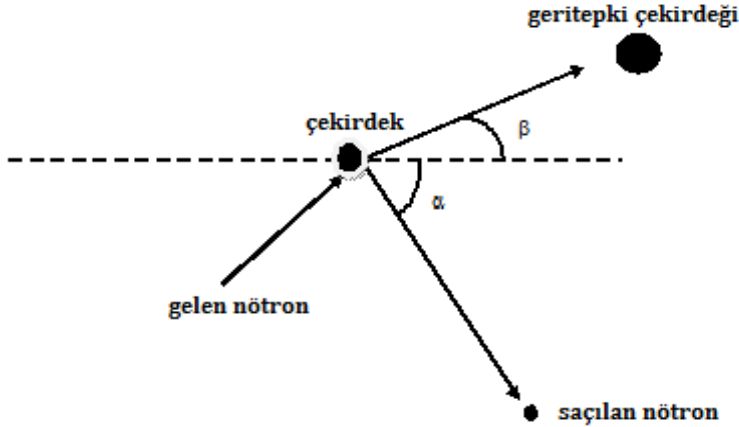
$$E_K = \frac{4M m_n}{(M+m_n)^2} \cos^2 \beta \quad (4.18)$$

M : Çekirdeğin kütlesi,

m_n : Nötronun kütlesi,

β : Geritepki çekirdeğinin nötronun geliş yolu ile yaptığı açı.

Nötron ve çekirdek arasındaki çarpışmasında iki uç noktadaki örneklere bakacak olursak. İlk örnek: $\beta = 90^\circ$, $\cos^2 \beta = 0$ ve $E_K = 0$. Bu şartlar altında nötron yönü değişmeden ve çekirdeğe enerji aktarmadan doğrudan yoluna devam eder. Nötron yoluna başka bir çekirdek ile karşılaşınca kadar devam eder. İkinci durum ise; $\beta = 0$ olduğunda nötron ile çekirdek kafa kafaya çarpışır. Bu durumda $\cos^2 \beta = 1$ olur ve çekirdeğe nötron tarafından maksimum enerji aktarımı olur. Çizelge 4.1, değişik atom çekirdekleri ile nötronun çarpışması sonucunda gelen nötronun kaybedeceği maksimum kinetik enerji değerlerini göstermektedir. Bu değerler 4.18 eşitliği ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 Nötronların çekirdek ile elastik çarpışmasının gösterimi

Çizelge 4.1’de de görüldüğü üzere nötron düşük kütleli atomlara daha fazla enerji aktarmaktadır. Ayrıca enerjisinin büyük miktarını çekirdekteki protona transfer edilmektedir. Bunun sebebi protonun kütesinin nötronun kütesine çok yakın olmasıdır. Bu yüzden düşük kütle numaralı nüklitler hızlı nötronları yavaşlatmakta iyi bir moderatördür. Su (H_2O), ağır su (D_2O), parafin (C_nH_{n+2}) ve grafit (C) nötronu yavaşlatmakta kullanılan en yaygın moderatörlerdir.

Çizelge 4.1 : Atomik kütle biriminden kütle artışına göre listelenmiş çeşitli çekirdekler ile nötronun çarpışması sonucu kaybedilen kinetik enerjinin maksimum kesiti (L'Annunziata, 2004).

Nüklit	Nüklidin kütlesi, M	Nötronun kütlesi, m_n	$E_k = \frac{4 M m_n}{(M + m_n)^2} \cos^2 \beta$
^1H	1.007825	1.008665	$4.065566/4.066232 = 0.999$ or 100%
^2H	2.014102	1.008665	$8.126217/9.137120 = 0.89$ or 89%
^9Be	9.012182	1.008665	$36.36109/100.41737 = 0.362$ or 36.2%
^{12}C	12.000000	1.008665	$48.41592/169.22536 = 0.286$ or 28.6%
^{16}O	15.994915	1.008665	$64.53404/289.12173 = 0.223$ or 22.3%
^{28}Si	27.976927	1.008665	$112.87570/840.16454 = 0.134$ or 13.4%
^{55}Mn	54.938047	1.008665	$221.65633/3130.0329 = 0.071$ or 7.1%
^{197}Au	196.96654	1.008665	$787.86616/39194.175 = 0.020$ or 2.0%

4.3.2 Elastik olmayan saçılma

Hızlı bir nötronun bir çekirdekle çarpıştığını resmedebiliriz. Yukarıdaki paragraflarda da anlatıldığı gibi çarpışma sonucunda nötron başka bir yönde saçılım yapar. Ancak, nötronun kinetik enerjisinin bir kısmı geri tepki çekirdeğine geçer ve bu da bu çekirdeği yarı kararlı hale geçirir. Elastik olmayan çarpışma, nötron yüksek atom numaralı bir çekirdek ile çarpıştığında meydana gelir. Geri tepki çekirdeği bu enerjiyi gama ışını yayarak veya uyarılmış halde yarı kararlı halde kalarak kaybedebilir. Bu yüzden elastik olmayan saçılmada momentumun korunumu söz konusu değildir.

Nötron saçılması, hızlı ve orta hızlı nötronları yavaşlatarak termal nötrona dönüştürmek için kullanılan yaygın bir mekanizmadır. Termal nötronlar 0.003-0.4 eV enerji aralığındaki parçacıklardır.

4.3.3 Nötron yakalama

Nötronların yüksüz olmasından dolayı yavaş nötronların düşük kinetik enerjilerine rağmen atom elektronlarının oluşturduğu kolomb kuvveti ile karşılaşmadan çekirdeğin etrafında kendilerine yer bulmaları göreceli olarak daha kolaydır. Yavaş nötron, çekirdeğe yaklaştığı anda içine girmesi ve çekirdekten tarafından yakalanarak nükleer reaksiyona neden olması kolaydır. Bu yüzden termal nötronların yakalanması çoğu radyonüklit ile mümkündür. Ayrıca nötron yakalama yavaş

nötronların madde ile yaptığı etkileşimde ana mekanizmadır. Çekirdeğin nötron yakalama gücü nötronun enerjisinin yanı sıra çekirdeğin tipine de bağlıdır. Nötron soğurma tesir kesiti σ , birimi 10^{-24} cm^2 veya barns, nüklitlerin nötron soğurma gücünü ölçmek için kullanılır.

Çekirdek tarafından yavaş nötronların yakalanması sonucunda yeni bileşik çekirdekteki nötronun bağlanma enerjisinden kısmen daha yüksek olan bir enerjiye karşılık gelen uyarılmış enerji seviyesinde bileşik çekirdek oluşur. Bu uyarılmış enerjisi genelde dışarıya gamma yayılımı şeklindedir. Bu tarz nötron yakalama reaksiyonları (η, γ) şeklinde gösterilir. (η, γ) nötron yakalama örneği aşağıdaki gibidir.



Bu nötron yakalama reaksiyonu ilginç bir özelliği var. Genelde ${}^{236}\text{U}$ ürün nüklidi %14 alfa yayılımı ile bozunurken, %86 oranda ise nötron yayılımı ile olan nükleer fizyon yaparak bozunmaktadır (L'Annunziata, 2004).

4.4 Yarı İletken Malzemelerin Radyasyon Karşısındaki Davranışları

Yarı iletken malzemeler radyasyondan temel olarak iki şekilde etkilenirler. Yer değiştirme bozukluğu ve iyonizasyon hatasıdır. Yer değiştirme bozukluğu; gelen radyasyonun silikon atomlarının kafes alanlarındaki yerini değiştirmesiyle olur. Bunun sonucunda oluşan bozukluklar kristalin elektronik karakteristiklerini değiştirir. İyonizasyon bozukluğu ise; yalıtkan katmanlardaki elektronik iyonizasyon tarafından soğurulan enerji başka yerlere nüfuz eden veya sürüklenen yük taşıyıcılarını serbest bırakarak yük istenmeyen yük yoğunluğuna neden olur. Bu da parazit alanların türemesine neden olur (Spieler, 1996). Her iki mekanizma da detektörler, transistörler ve entegre devreler için önemlidir. Bazı cihazlar iyonizasyon sonucu oluşan etkiler çok duyarlı iken bazıları da yer değiştirme sonucu oluşan bozukluklara karşı hassastır.

İyonizasyon etkileri öncelikle soğurulan enerjiye bağlıdır ve radyasyonun tipinden bağımsızdır. İyonizasyon sonucu oluşan hasar birim hacim başına soğurulan enerji miktarı ile ölçülebilir ve genellikle rad veya gray birimi ile ifade edilir. (1 rad = 100 erg/g, 1 Gy = 1 J/kg = 100 rad). Yer değiştirme hasarı ise iyonizan olmayan enerji kaybına bağlıdır. Örneğin; kristal kafes atomlarına enerji ve momentum transferi

olur. İyonizan radyasyonu ölçen basit bir mekanizma pek olanaklı değildir. Bu yüzden yer değiştirme hasarı parçacık ve enerji tipine göre özgülleştirilmelidir. Genelde radyasyon etkileri her iki mekanizma için de ölçülmelidir (Spieler, 1996).

Radyasyonun oluşturduğu yer değiştirme hasarını kısa bir örnekle açıklayalım. Silikon atomu içeren yarı iletken bir malzemeye 20 eV'lik enerji verme kapasitesine sahip bir foton veya parçacık atomu düştüğünde silikon atomunu kristal kafes alanından oynatabilir. Bu da malzemede kusur kümelerinin oluşmasına neden olur. Örneğin; 1 MeV enerjili nötron Si geritepki atomuna yaklaşık olarak 60 ila 70 eV arasında bir enerji transfer eder. Bu da yaklaşık 0.1 μm boyutundaki bir alanda 1000 tane atomun yer değiştirmesine neden olur. Yer değiştirme hasarı iyonizan olmayan enerji kaybı ile doğru orantılıdır. Ancak toplam soğurulan enerji ile doğru orantılı değildir. X ışınları momentum korunumundan dolayı fotonlar için oluşan 250 keV'lik eşik değeri ötürü doğrudan yer değiştirme hasarına neden olmazlar. Gama ışınları compton elektronlarının sebep olduğu yer değiştirme hasarı oluştururlar. Çizelge 4.2'de değişik radyasyon tiplerine göre malzemede oluşan yer değiştirme hasarları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2 : Değişik tip ve enerjideki radyasyonun oluşturduğu yer değiştirme hasarı göreceli karşılaştırılması (Spieler, 1996).

Particle	Proton	Proton	Nötron	Elektron	Elektron
Energy	1 GeV	50 MeV	1 MeV	1 MeV	1 GeV
Göreceli Hasar	1	2	2	0.01	0.1

Radyasyon sonucu oluşan iyonizasyon etkileri genel olarak ara yüz hapsedilmiş yüküne, oksitlenmiş hapsedilmiş yüke, hapsedilmiş yükün devinimine ve yükün voltaj ve zamana bağlı durumuna bakılarak belirlenir (Spieler, 1996).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Al ile uyarılmış ZnO ince filmler sol jel daldırarak kaplama yöntemi ile üretilmiştir. Soda kireci ve borosilikat camı kaplama ana malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama işlemi sırasıyla solün hazırlanması, kaplama malzemesinin temizlenmesi, daldırarak kaplama, ön ısıtma ve birden fazla son ısıtma yapılarak tamamlanmıştır. Kaplama ve tavlama işlemleri 5'er kez tekrarlanmıştır. 550, 600 , 700 ve 800 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta tavlama işlemleri, 1'er saat süreyle yapılmış olup, oksijen, azot ve vakum olmak üzere, üç farklı ortamda tavlama işlemleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmada üretilen ZnO:Al ince filmler TRIGA Mark II tarafından üretilen nötronlar ile bombardıman edilerek radyasyonun malzemenin özelliklerini nasıl değiştirdiği araştırılmıştır. Dört farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al ince filmlerin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler incelenmiştir.

5.1 Solün Hazırlanması

Sol hazırlama, daldırarak kaplama yönteminin ilk aşamasıdır. Öncü çözeltinin hazırlanma aşamasında başlangıç malzemesi çinko asetat 2 hidrattır (%99.5 safsızlık, $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$). Saf etanol çözücü olarak dietanolin ($DEA(CH_2CH_2OH)_2$) sol dengeleyici olarak kullanılmıştır. Alüminyum, $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ formunda katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Çözeltideki katkı maddesinin [Al/Zn] molar oranı dört farklı miktarda hazırlanmış olup sırasıyla 0.8, 1.0, 1.2 and 1.6 %'dir. Sonuçta oluşan karışım berrak ve homojen bir karışım olması için 60 °C'de bir saat süreyle manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karıştırma esnasında kullanılan cihaz Heidolph MR 3001K marka bir manyetik karıştırıcıdır. Soğutma işleminin ardından çözelti, oda sıcaklığında (22 °C) 24 saat bekletilmiştir. Hazırlanan çözeltinin dayanıklılığını ve ömrünü etkileyen en önemli etmenler sıcaklık ve nemdir. Bu

sebeple ortam nemi nem giderici ile çözeltinin hazırlanma ve kaplama esnasında sabit olarak 43 % seviyesinde tutulmuştur.

5.2 Kaplama Malzemesinin Hazırlanması

Yapılan ince filmlerin özelliklerini etkilediğinden ötürü kaplama malzemesinin temizliği çok önemlidir. Kaplama malzemesi ne kadar temiz olursa yapılan ince film o kadar kaliteli olur.

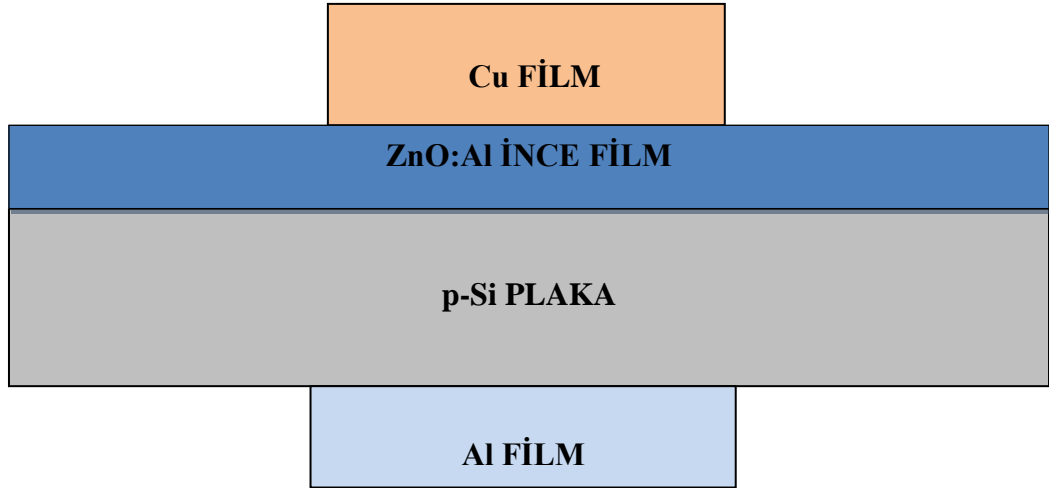
Bu çalışmada alt tabaka olarak 35x35 mm boyutlarında borosilikat camı kullanılmıştır. İlk olarak alt tabaka malzemeleri deterjan ve iyonsuzlaştırılmış suda temizlenmiştir. Ardından sırasıyla; aseton, etanol ve iyonsuzlaştırılmış suya onar dakika koyularak ultrasonik olarak temizlenmiştir. Son olarak da kurutma işlemi uygulanmıştır. Ultrasonik banyo için Bondelin Sonoreks marka cihaz kullanılmıştır. Ayrıca sol hazırlamada kullanılan bütün laboratuvar malzemeleri önceden deterjan ile temizlenmiştir.

5.3 Yapılan Kaplama İşlemleri

ZnO:Al ince filmler iki farklı alt tabaka, 10x30 mm dikdörtgen p tipi silikon plaka ve 35x35 mm borosilikat cam, ile daldırarak kaplama yöntemiyle ideal koşullar altında kaplanmıştır. Temiz alt tabakalar hazırlanmış solün içine bilgisayar kontrollü daldırarak kaplama cihazı (KSV LMX2) ile batırılmıştır. Tabakalar 200 mm/dk hız ile daldırılıp geri çıkartılmıştır. Daldırma ve çıkartma işlemi arasında geçen süre 5 saniyedir. Kaplamanın hemen ardından filmler 400 °C hava ile 10 dakika kurutulmuştur. Kaplama ve kurutma işlemi art arda 4 defa tekrar edilmiştir. Daha sonra filmler 550 ile 900 °C arasındaki sıcaklıklarda bir saat süreyle vakum (0.3 Pa) altında tavlansmıştır. Nötrona maruz bırakılmış ince filmlerin elektriksel özelliklerini sıcaklık değişkeninin nasıl etkilediği araştırmak için 1.2 % Al konsantrasyonuna sahip ince filmler sırasıyla 600,700 ve 800 °C de tavlansmıştır. Aynı işlem sıcaklık (800 °C) sabit tutulup konsantrasyon değerleri farklı ince filmler için de yapılmıştır. Farklı ortamlarda tavlansmış ince filmlerin nötrona maruz kaldıktan sonra elektriksel özelliklerini incelemek için vakum, azot ve oksijen ortamında sabit sıcaklık (700°C) ve Al konsantrasyonu (1.2%) ile tavlama yapılmıştır.

5.4 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların I-V Karakteristiklerinin Ölçümü İçin Hazırlanması

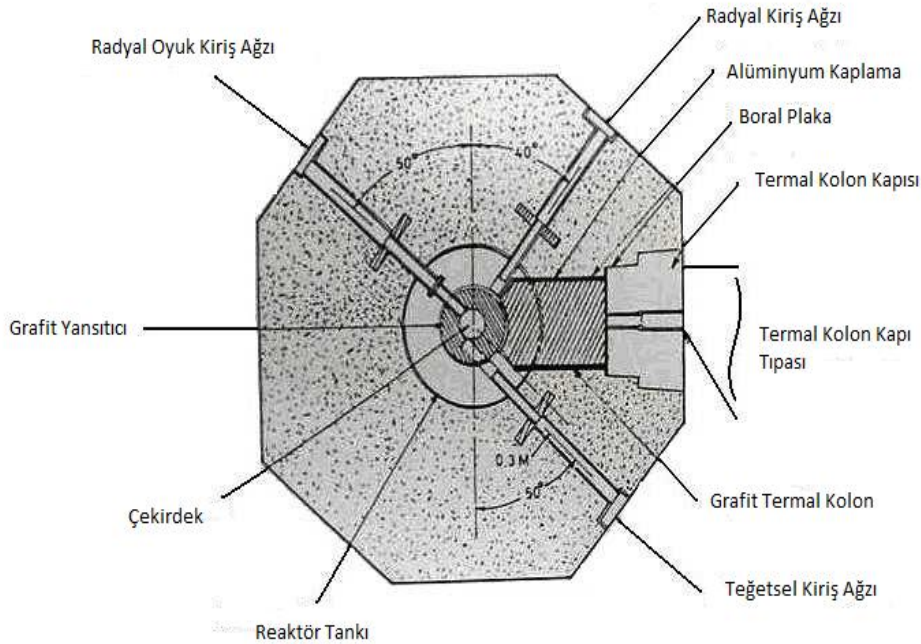
I-V karakteristikleri ölçülecek numuneler Univex 450 marka termal buharlaştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. ZnO:Al ince filmlerin p tipi silikon plaka ile kaplanmasının ardından silikon plakanın açık tarafında omik kontak oluşturmak için yaklaşık olarak 0.8 µm kalınlığındaki alüminyum tabakalarla termal buharlaştırıcı tarafından kaplanmıştır. Diğer omik kontak ise silikon plakanın ZnO:Al film tarafına 0.8 µm kalınlığındaki bakırların termal buharlaştırıcı cihazı ile kaplanmasıyla oluşturulmuştur. Vakum ortamında ($\sim 6.5 \times 10^{-6}$ Pa) termal buharlaştırıcı ile silikon plakanın her iki tarafına yapılan Cu ve Al kaplaması boyunca silikon plakanın yüzeyi sadece ortasında Al ve Cu'nun omik kontaklarının oluşması için sırasıyla 0.25 cm² ve 0.07 cm² kesit alanları açık kalacak şekilde maskelenmiştir. I-V analizi oda sıcaklığında, karanlık ve aydınlık ortamlarda -20 ile +20 aralığında DC voltajı ölçümü alınarak yapılmıştır. Bu ölçümlerde Keithley 4200 marka yarı iletken karakterizasyon sistemi kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Nötronlara maruz kalan Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki yapı

5.5 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nde Nötronlara Maruz Kalması

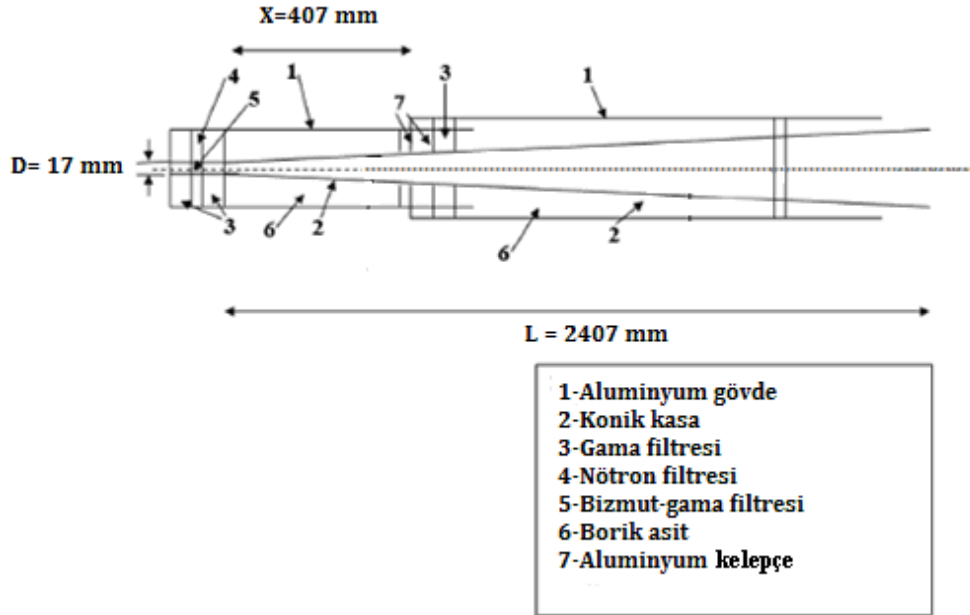
ZnO:Al/p-Si heterokavşaklar ve ZnO:Al ince filmler İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün teğetsel ışınlama tüpünde nötronlara maruz bırakılmıştır. Reaktör kalbinden yayılan nötronları gama ışınlarından ayırt edebilmek teğetsel ışınlama tüpünde bizmut filtre bulunduğundan, önemli ölçüde gama ışınlarının filtre edilmesi mümkün olabilmektedir. Termal nötronların kolimatörden geçmesi sağlanırken, filtre sayesinde, gamma ışınlarının geçişi engellenebilmektedir. Bu ışınlama esnasında söz konusu ortamda termal ve epitermal nötronların açığa çıkması söz konusudur. Işınlama tüpündeki nötron/gama ışını oranı $\sim 1.44 \times 10^4$ ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} mR^{-1}$)'dir. Kolimatörün giriş deliği çapı, D, 17 mm ve kolimatör deliğinin uzunluğu, L, 2407 mm'dir. Tüp girişindeki termal nötron akısı $\sim 1.67 \times 10^{11} cm^{-2} s^{-1}$ 'dir. Şekil 5.2'de İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün ışınlama düzeneklerinin yatay kesiti arz edilmektedir (Baydoğan ve diğ., 2013).



Şekil 5.2 : İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün ışınlama düzeneklerinin yatay kesiti (Baydoğan ve diğ., 2013)

5.6 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların Işınlama İşlemlerinin Gerçekleştirildiği İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün Teğetsel Işınlama Tüpü

p-Si taşıyıcılar üzerindeki, ZnO:Al ince filmler, İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün, Teğetsel Işınlama Tüpündeki kolimatöre yerleştirilerek termal nötronlar ile ışınlanmıştır. Şekil 5.3'te teğetsel ışınlama tüpü arz edilmektedir. $10 \times 15 \text{ mm}^2$ boyutlarında hazırlanmış örnekler, İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün, teğetsel ışınlama tüpü'nde ~ 3 saat ve ~ 7 saat olmak üzere, farklı sürelerde nötronlara maruz bırakılmıştır. Bu tez çalışmasında reaktör 250 kW güç ile çalıştırılmıştır (Baydoğan, ve Tuğrul, 2013).



Şekil 5.3: İTÜ TRIGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün teğetsel ışınlama tüpü (Baydoğan, ve Tuğrul, 2013)

6.DENEY SONUÇLARI

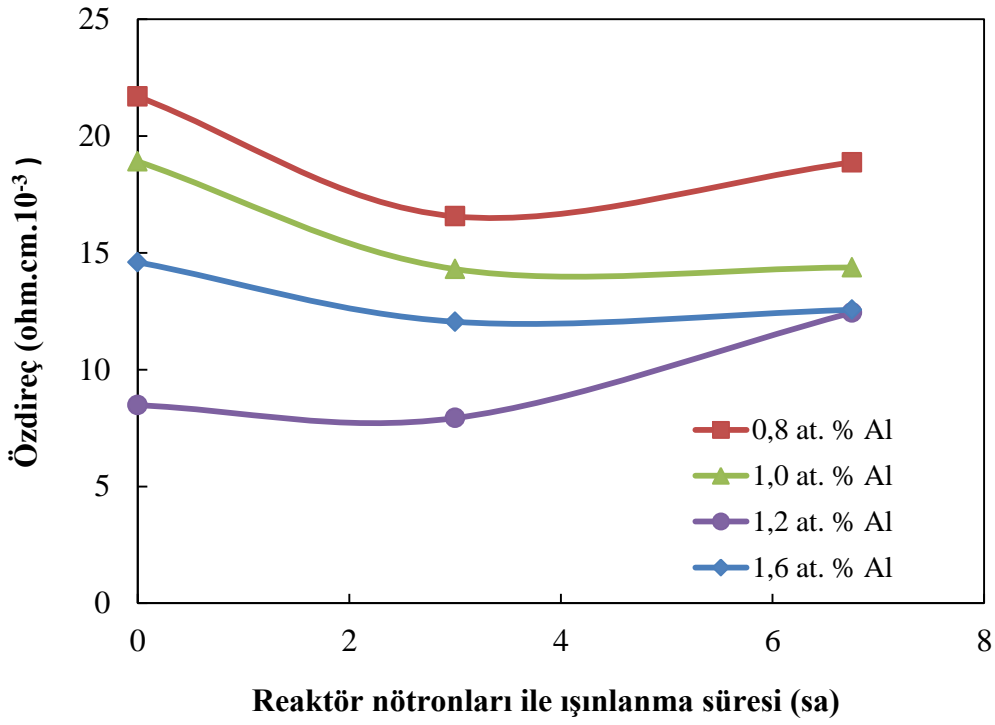
6.1. Nötronlara Maruz Kalan p-Si taşıyıcılar Üzerinde Tavlanmış ZnO:Al İnce Filmlerin Yüzeyindeki Elektriksel Direncinde Oluşan Değişimler

6.1.1 Nötronlarla ışınlaması sonucu farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al ince filmlerin yüzeyindeki elektriksel dirençlerinin değişimi

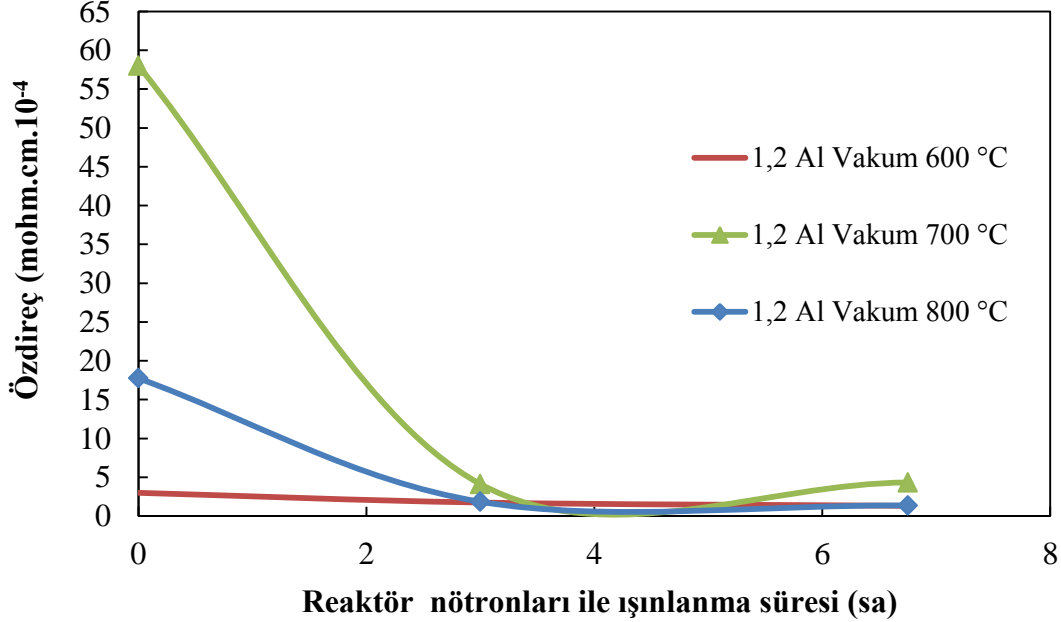
Farklı Al konsantrasyonlarında katkılanan ZnO:Al ince filmlerin nötronlarla ışınlama sonrasında, yüzeyindeki öz direncinde oluşan değişimler Şekil 6.1’de arz edilmektedir. 700°C sıcaklıkta azot atmosferinde tavlama ve daha sonra teğetsel ışınlama tüpünde nötronlara maruz kalan, ZnO:Al ince filmlerin öz direncinde ışınlama süresinin artışına bağlı olarak azalma olduğu tespit edilmiştir. ZnO:Al ince filmlerin tavlama sıcaklığının 600°C’den 800°C artışı filmlerin elektriksel özelliğini değiştirdiği görülmektedir. Nötronlara maruz kalma süresini ince filmlerin elektriksel iletkenliğinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Şekil 6.3’te görüldüğü gibi en düşük öz dirence sahip olan ince film 700 °C’de 1,2 Al katkılı olandır. Diyot olmaya en uygun olan ince filmdir.

6.1.2. Nötronlara maruz kalan vakumda tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler

1,2 at. % Alüminyum Konsantrasyonundaki ince filmlerin direncinde oluşan değişimler Şekil 6.2’de arz edilmektedir. Teğetsel ışınlama tüpünde nötronlara maruz kalan ince filmlerin öz direncinde ışınlama süresinin artışına bağlı olarak azalma olduğu tespit edilmiştir. ZnO:Al ince filmlerin tavlama sıcaklığının 600°C’den 800°C artışı filmlerin elektriksel özelliğini değiştirdiği görülmektedir. Nötronlara maruz kalma süresinin ince filmlerin elektriksel iletkenliğinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir.



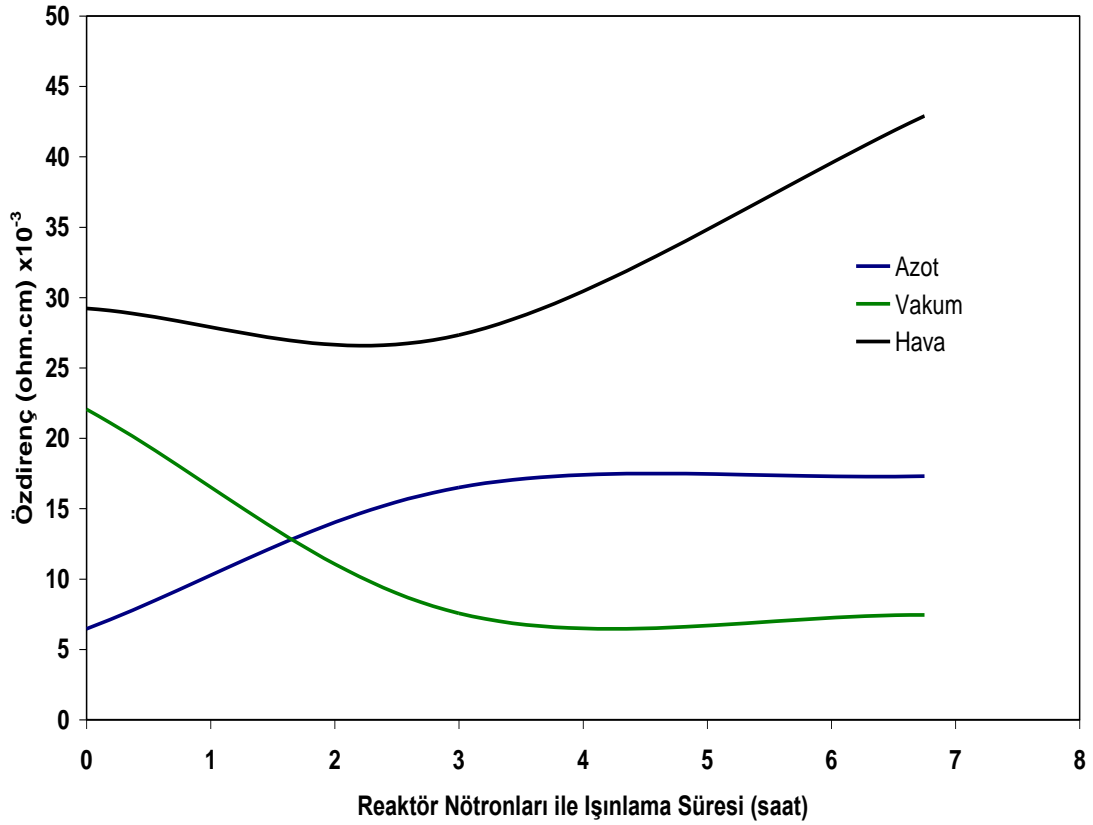
Şekil 6.1 : Farklı konsantrasyonda Al katkılı Azot ortamında 700 °C’de tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin özdirençlerinin ışınlama süresi ile değişimi.



Şekil 6.2 : Vakum ortamında değişik sıcaklıklarda tavllanmış ZnO:Al/p-Si ince filmlerin özdirençlerinin ışınlama süresi ile değişimi.

6.1.3 Farklı atmosferlerde p-Si tabaka üzerinde tavllanmış ZnO:Al ince filmlerin nötronlarla ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler

1.2 at% Alüminyum konsantrasyonunda katkılanmış ZnO:Al ince filmler üç farklı tavlama ortamında 700°C’de tavlamıştır. P-Si taşıyıcılar üzerinde, azot, vakum ve hava olmak üzere üç farklı ortamda tavllanmış ZnO:Al ince filmler reaktör nötronlarına maruz kaldıktan sonra bu ince filmlerin elektriksel özelliklerinde değişiklikler oluştuğu tespit edilmiştir. ZnO:Al ince filmlerin reaktör nötronları ile ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak yüzeyindeki öz direncinde oluşan değişimler Şekil 6.3’de arz edilmektedir. Havada öz direncin artmasının nedeni olarak, havanın film yüzeyinde daha fazla oksitleyici etkisi olduğu düşünülmüştür.



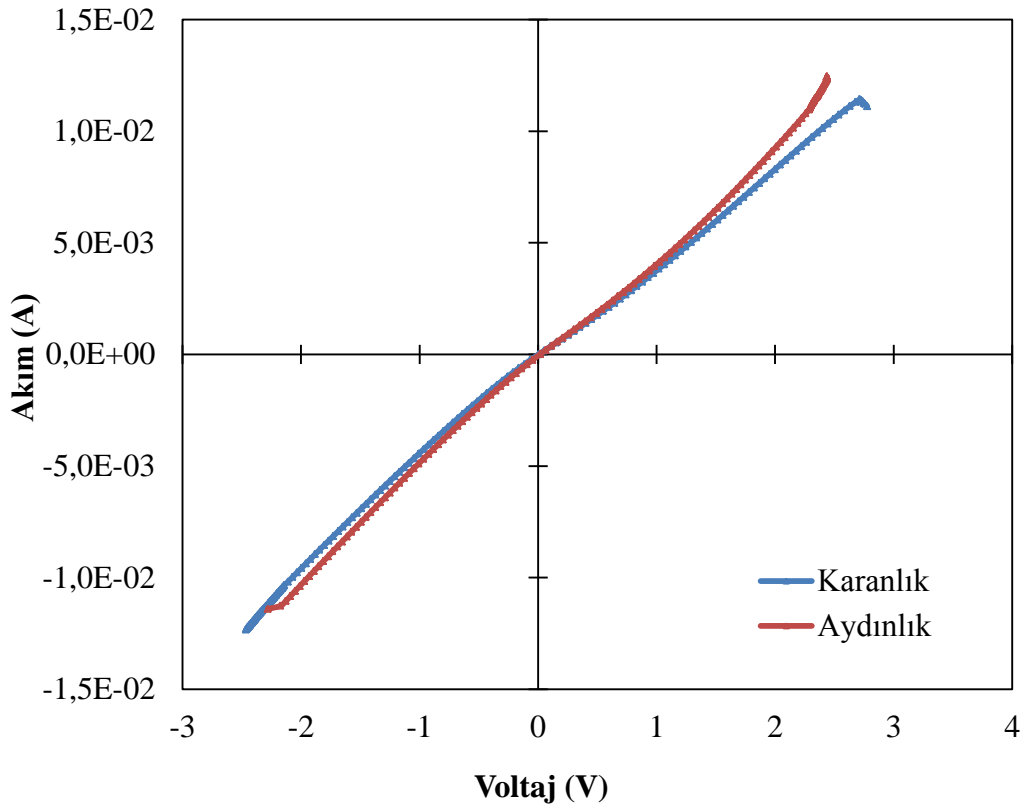
Şekil 6.3 : Farklı atmosferlerde p-Si tabaka üzerinde tavllanmış ZnO:Al ince filmlerin nötronlarla ışınlama süresindeki artışa bağlı olarak yüzeyel elektrik direncinde oluşan değişimler

6.2 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

6.2.1 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi

1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al ince filmler elektriksel en düşük yüzey direnci arz ettiklerinden, 600°C'de tavlandıktan sonra bu filmlerin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler incelenmiştir.

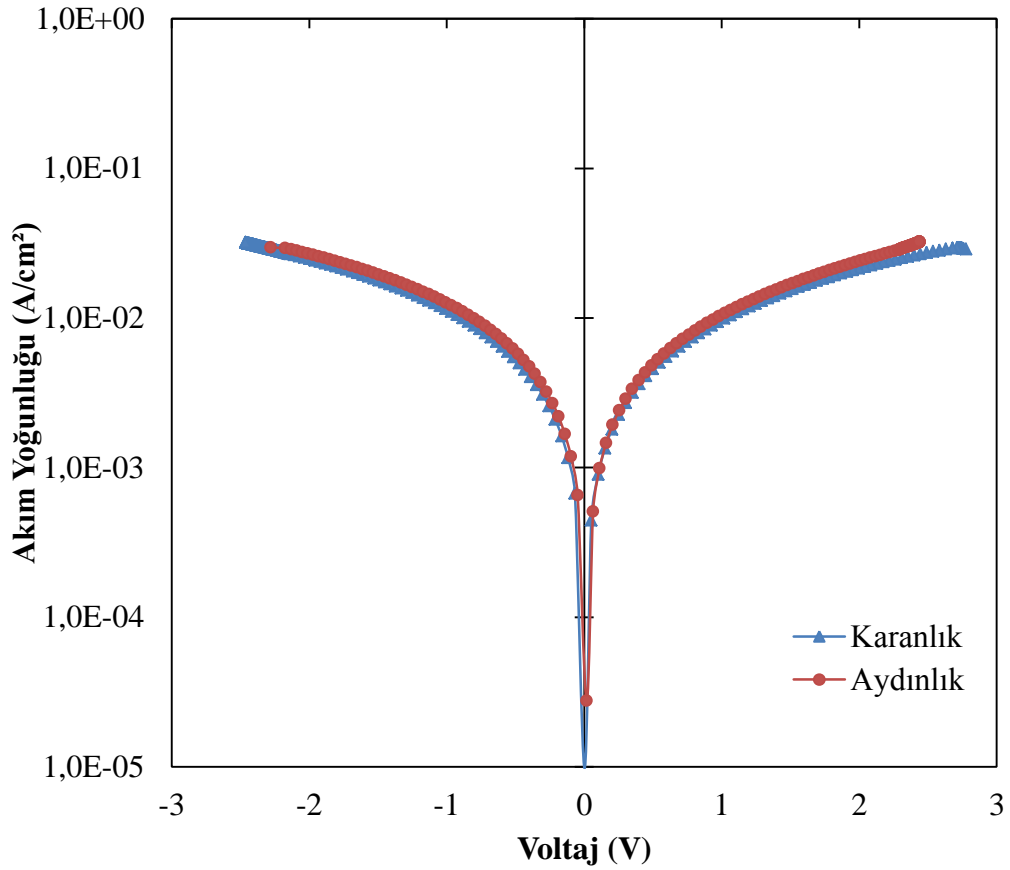
p-Si tabakalar üzerinde, 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al ince filmler vakum ortamda 600 °C tavlansmıştır. Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki yapının karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristikleri incelenmiştir (Şekil 6.4). Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki yapının aydınlık ortamdaki I-V karakteristiklerinin bir miktar daha geliştiği görülmüştür.



Şekil 6.4 : 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi

Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki yapının karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler Şekil 6.5 incelenmiştir.

Bu amaçla, p-Si tabakalar üzerinde 1,2 at. % Al konsantrasyonunda katkılanıp, sonra vakum ortamda 600 °C tavlanan filmlerin akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Söz konusu yapının aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj karakteristikleri ile karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj karakteristiklerinin birbirine benzediği görülmüştür.

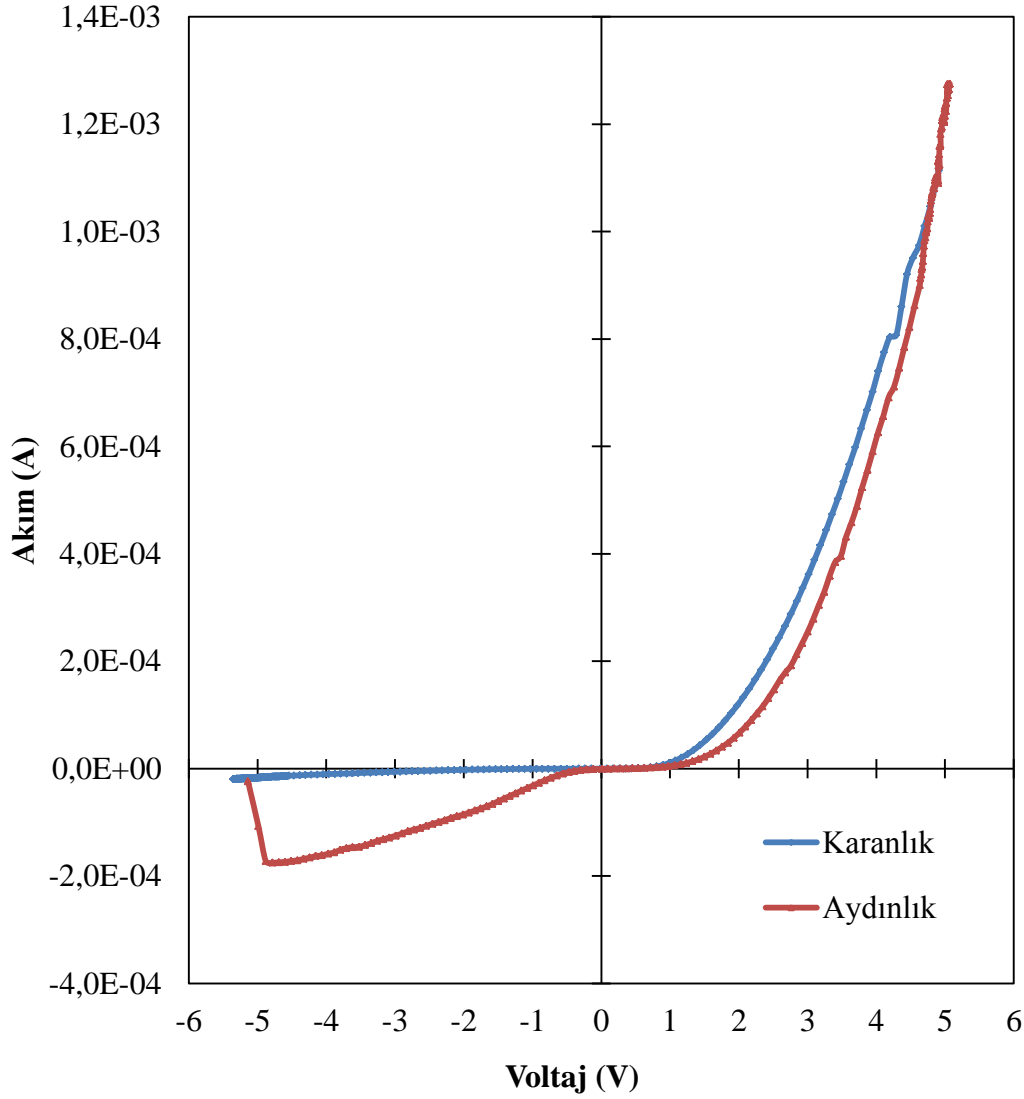


Şekil 6.5 : 1,2 at. % Al katkılı 600 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi

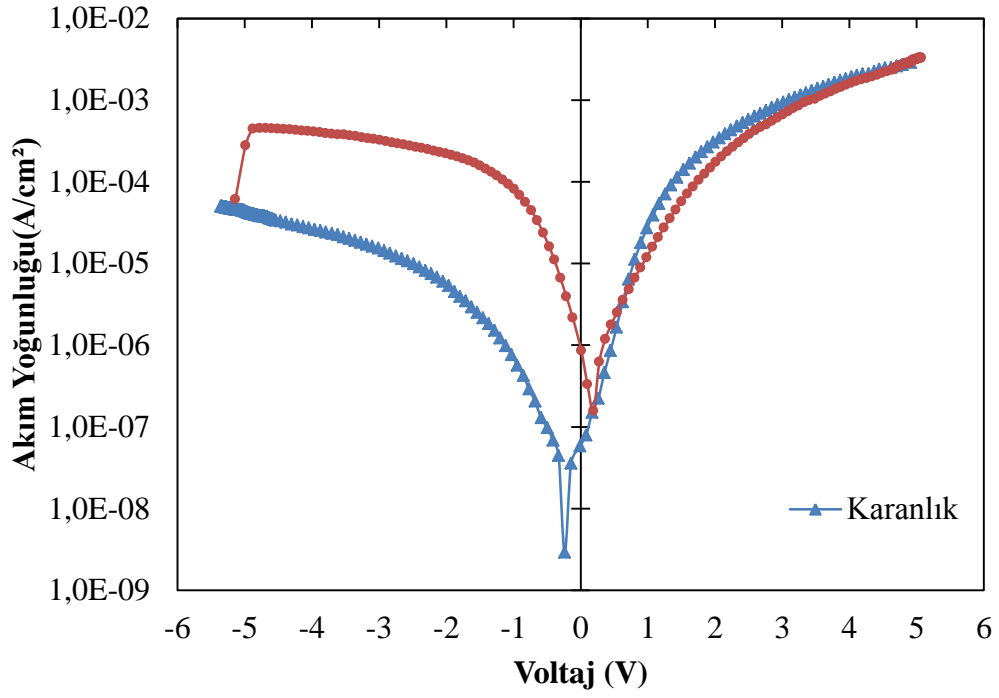
6.2.2 Farklı miktarda Al katkılı 700 °C sıcaklıkta vakumda tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi

ZnO:Al ince filmlerin yüzeyindeki elektriksel dirençleri incelendiğinde en düşük yüzey direnci 700°C’de tespit edilmiştir. Bu nedenle, 700°C’de vakum ortamda tavllanmış filmlerin elektriksel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır. Sırasıyla, 0,8, 1,0, 1,2 ve 1,6 at.% Al konsantrasyonlarında olmak üzere dört farklı miktardaki Al katkılı ZnO ince filmlerin bu sıcaklıkta vakumda

tavlandıktan sonra karanlık ve aydınlık ortamlardaki elektriksel özellikleri incelenmiştir. 0,8 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerin değişimleri Şekil 6.6'da arz edilmektedir. 0,8 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu voltaj değişimleri ise Şekil 6.7'de arz edilmektedir.

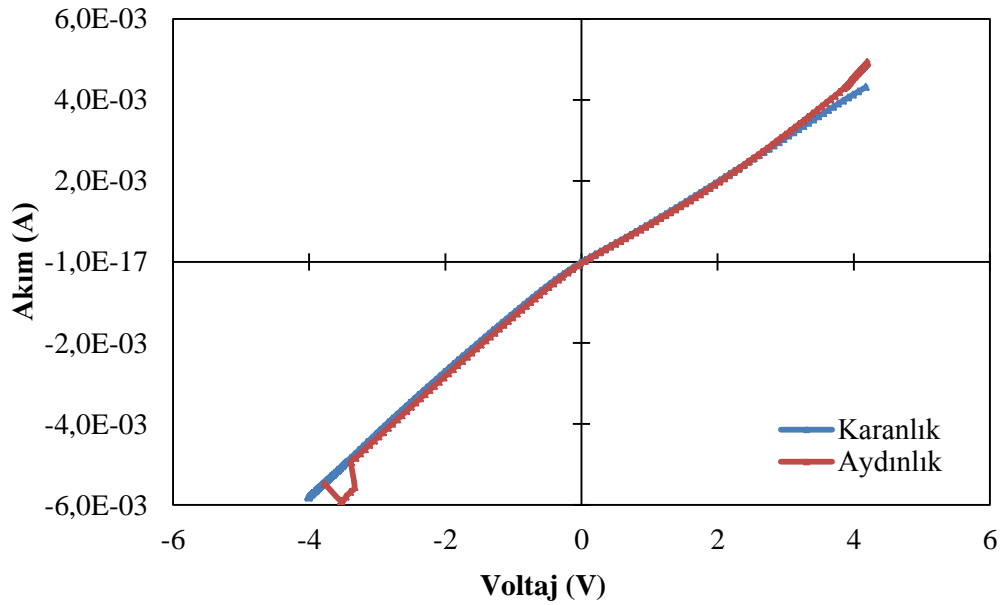


Şekil 6.6 : 0,8 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.

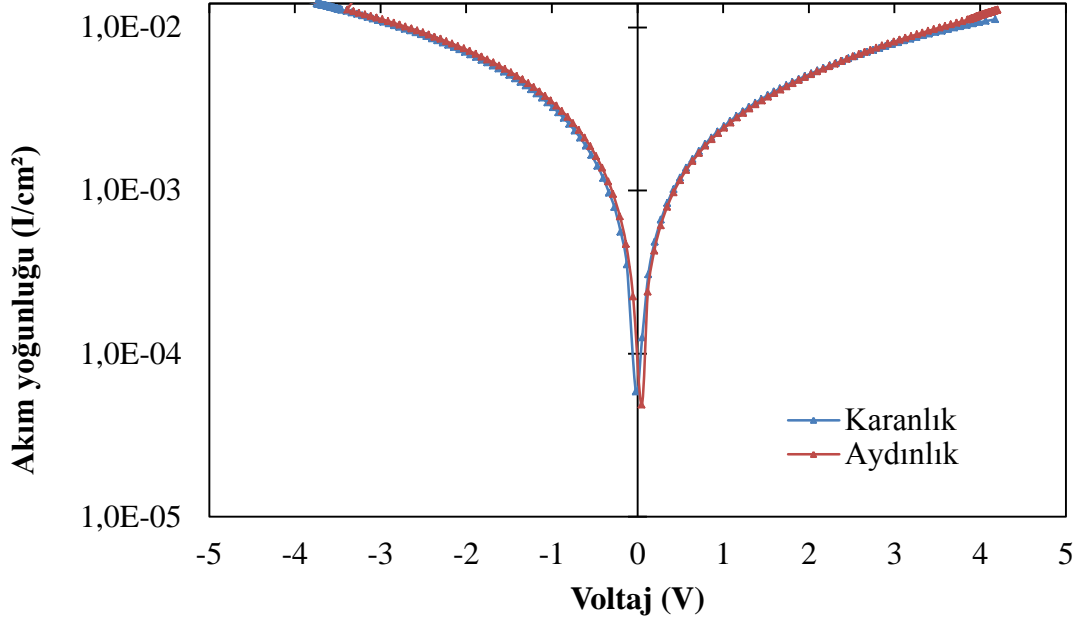


Şekil 6.7 : 0,8 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi

1,0 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerin değişimleri Şekil 6.8’de arz edilmektedir. 1,0 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu voltaj değişimleri ise Şekil 6.9’de arz edilmektedir.

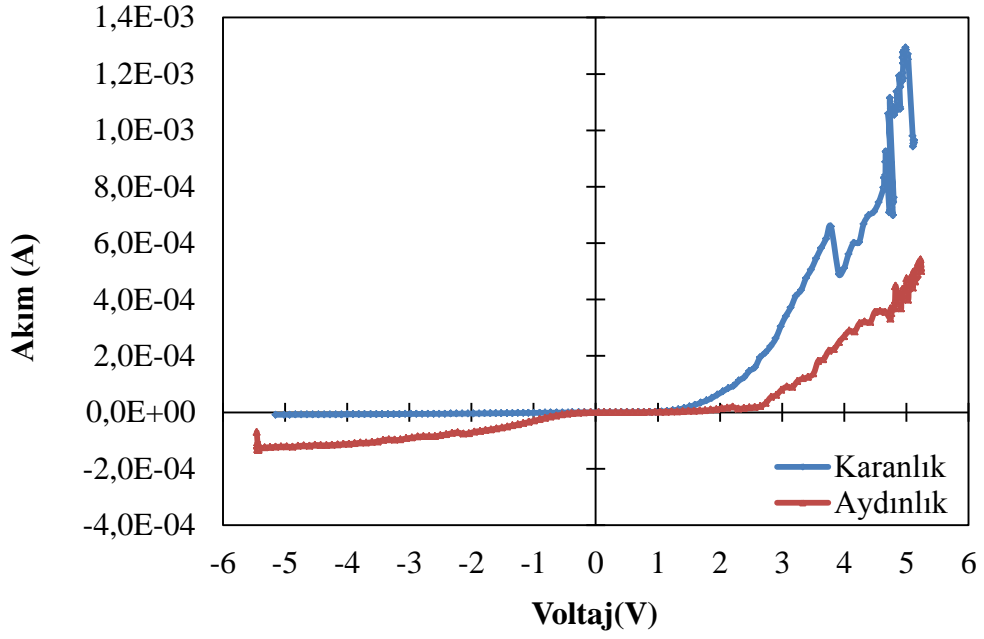


Şekil 6.8: 1,0 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi

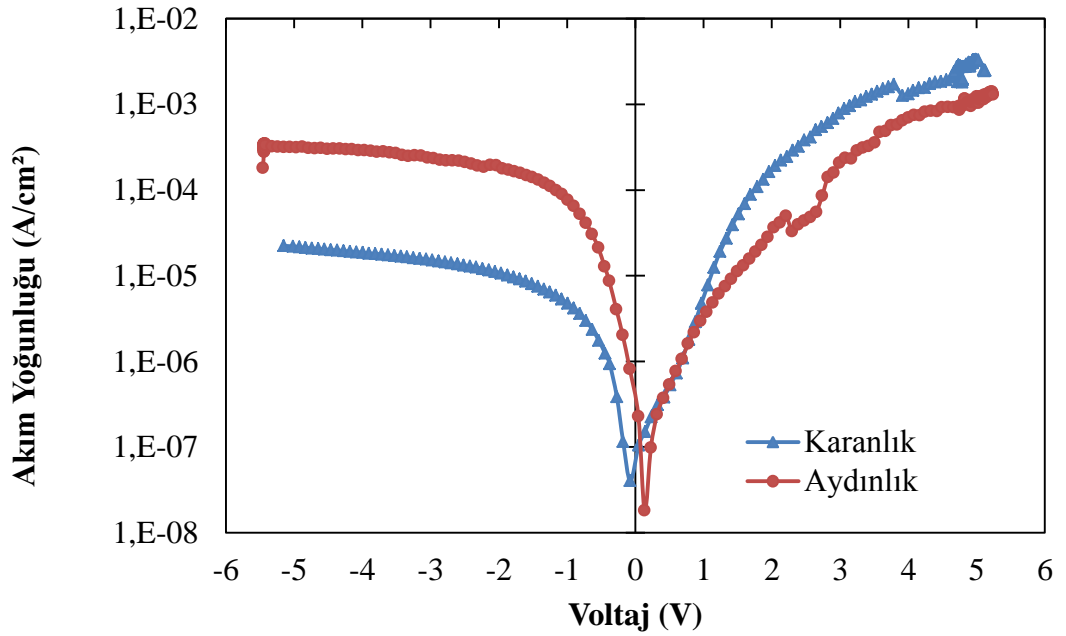


Şekil 6.9 : 1,0 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi

1,2 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerin değişimleri Şekil 6.10'da arz edilmektedir. 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu voltaj değişimleri ise Şekil 6.11'de arz edilmektedir.



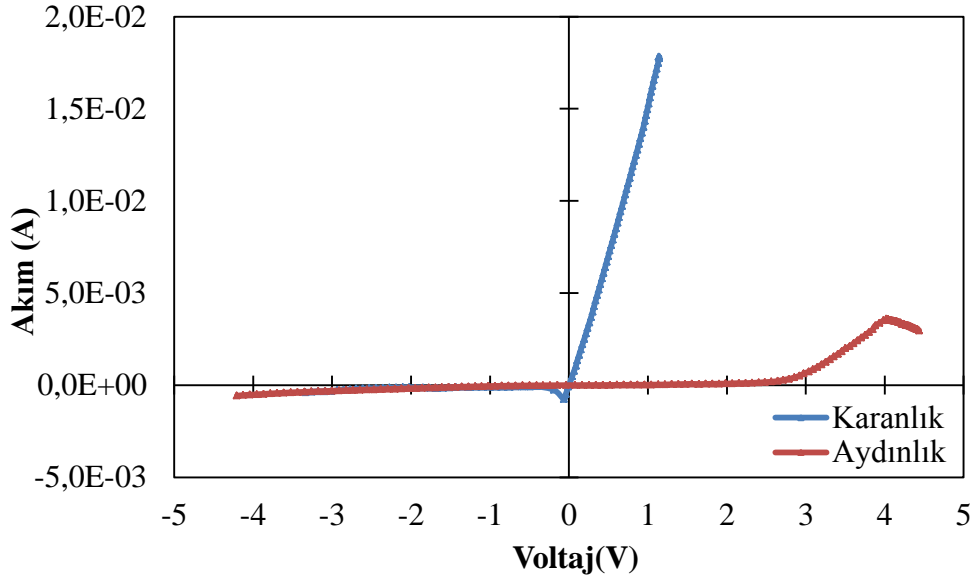
Şekil 6.10 : 1,2 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi



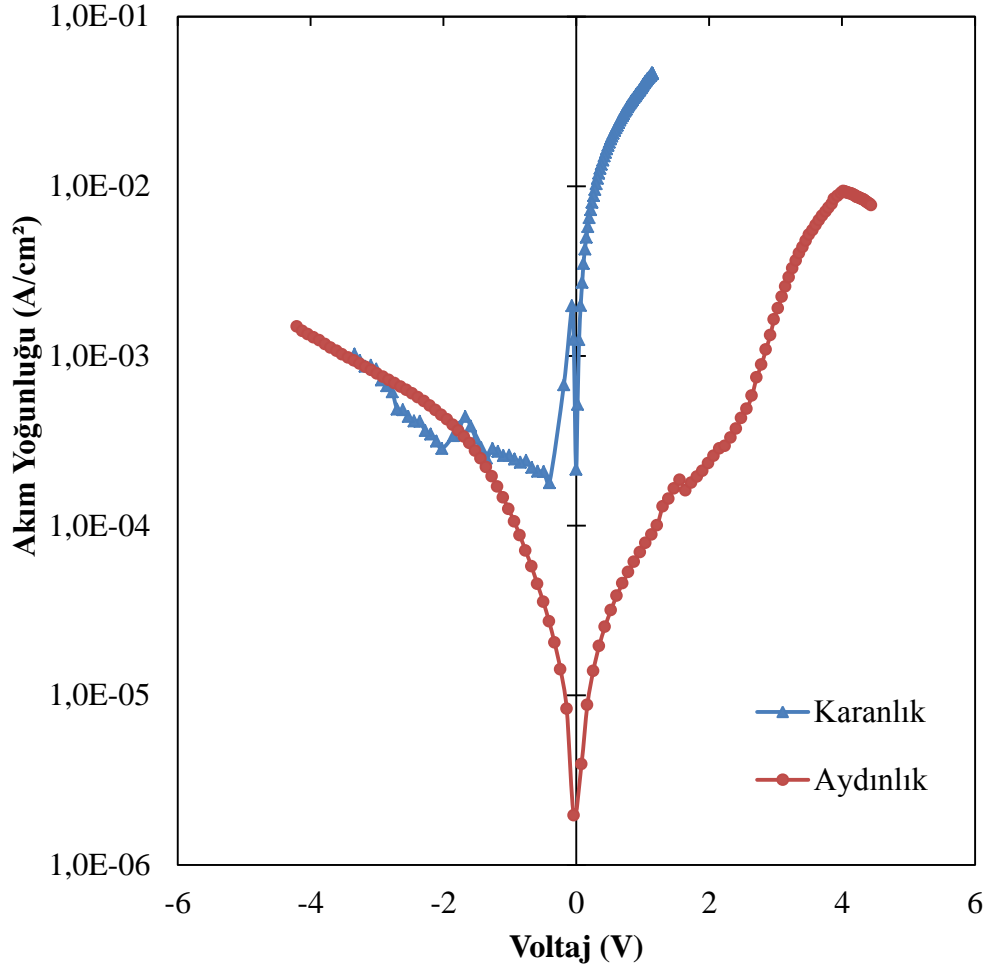
Şekil 6.11 : 1,2 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi

1,6 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerin değişimleri Şekil 6.12’de arz edilmektedir. 1,6 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların

karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu voltaj değişimleri ise Şekil 6.13’de arz edilmektedir.



Şekil 6.12 : 1,6 at. % Al katkılı 700 °C tavlannmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi

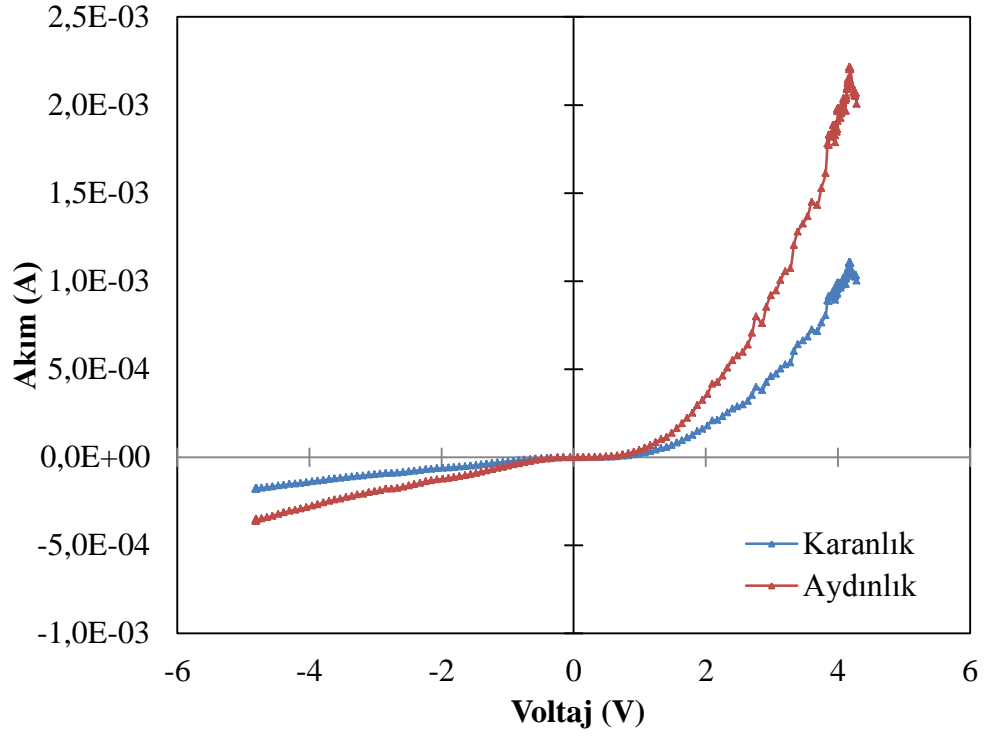


Şekil 6.13 : 1,6 at. % Al katkılı 700 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi

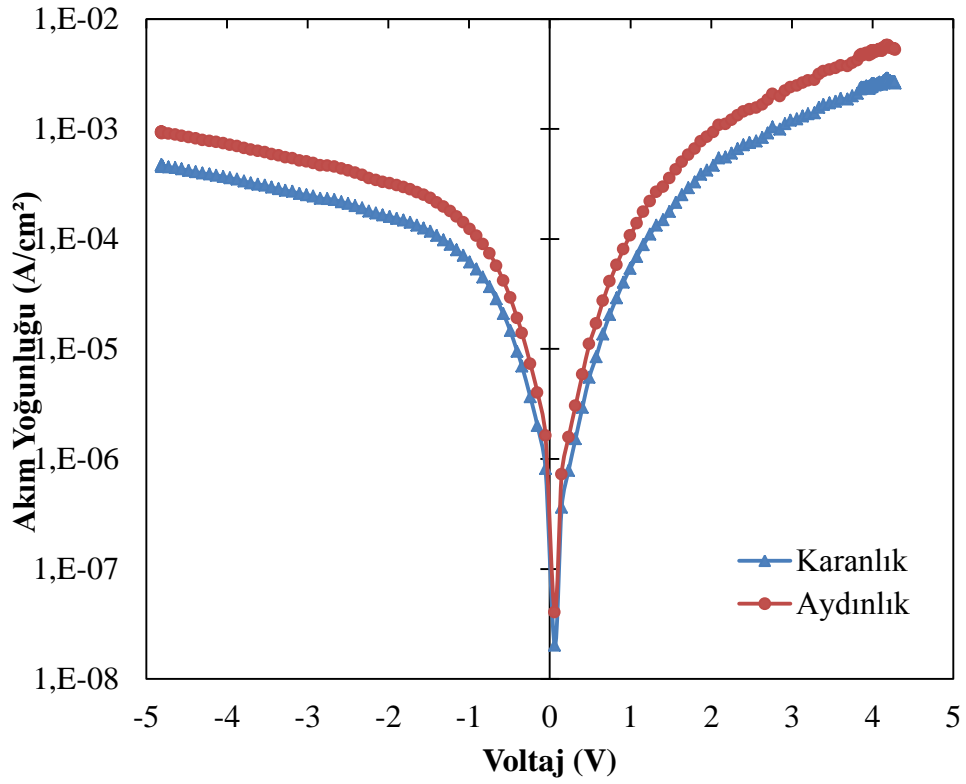
6.2.3 1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi

1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al ince filmler elektriksel en düşük yüzey direnci arz ettiklerinden, ayrıca 800°C’de tavlandıktan sonra bu filmlerin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler incelenmiştir.

1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V karakteristiklerin değişimleri Şekil 6.14’de arz edilmektedir. 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu voltaj değişimleri ise Şekil 6.15’de arz edilmektedir.



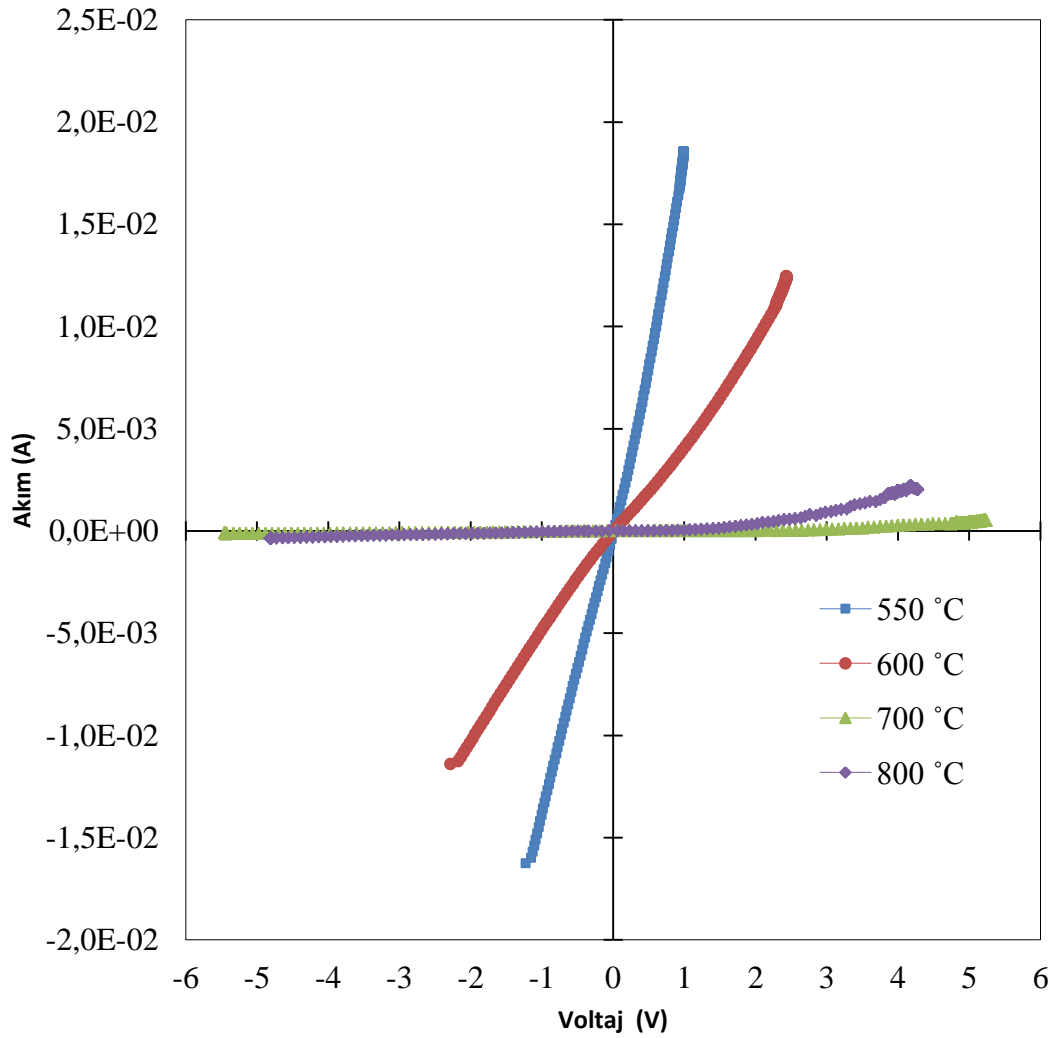
Şekil 6.14 : 1,2 at. %Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-voltaj değişimi.



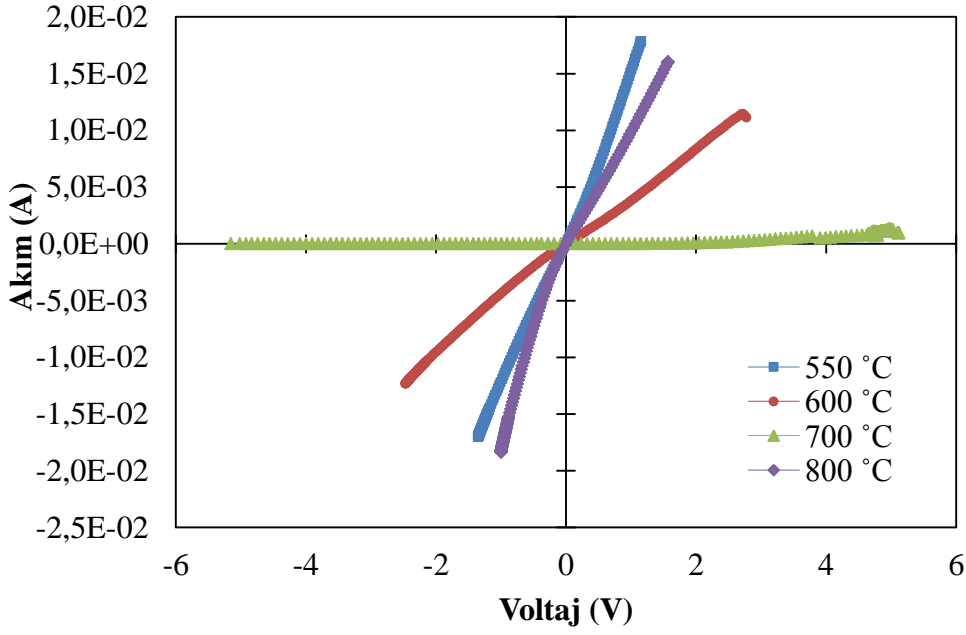
Şekil 6.15 : 1,2 at. % Al katkılı 800 °C tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-voltaj değişimi

6.3 ZnO:Al/p-Si Heterokavşakların I-V Karakteristiklerinin Mukayeseli Olarak İncelenmesi

Farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki I-V karakteristiklerinde oluşan değişimler Şekil 6.16'da arz edilmektedir. 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların vakum ortamında tavlama sıcaklığına bağlı olarak karanlık ortamdaki I-V karakteristiklerinde oluşan değişimler Şekil 6.17'de arz edilmektedir.



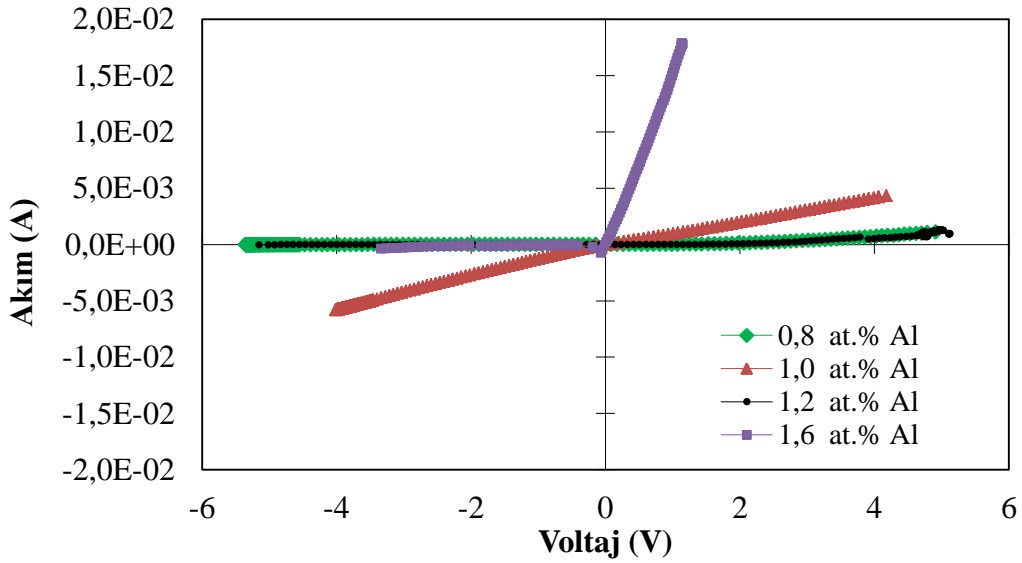
Şekil 6.16 : Farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri.



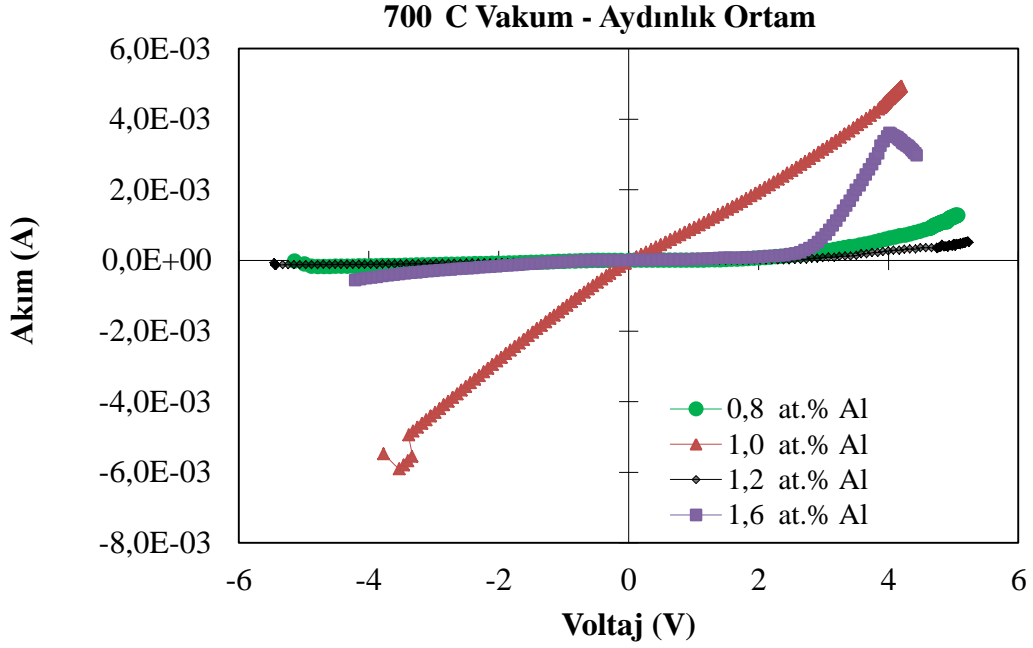
Şekil 6.17: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri.

En iyi elektriksel özellikler 700 °C’de tavllanmış filmlerde elde edilmiştir. Bu nedenle 700 °C sıcaklıkta tavllanmış filmler detaylı olarak incelenmiştir. Al konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki I-V karakteristiklerinde oluşan değişimler Şekil 6.18’de ve aydınlık ortamdaki I-V karakteristiklerinde oluşan değişimler Şekil 6.19’da arz edilmektedir.

700 C Vakum - Karanlık Ortam

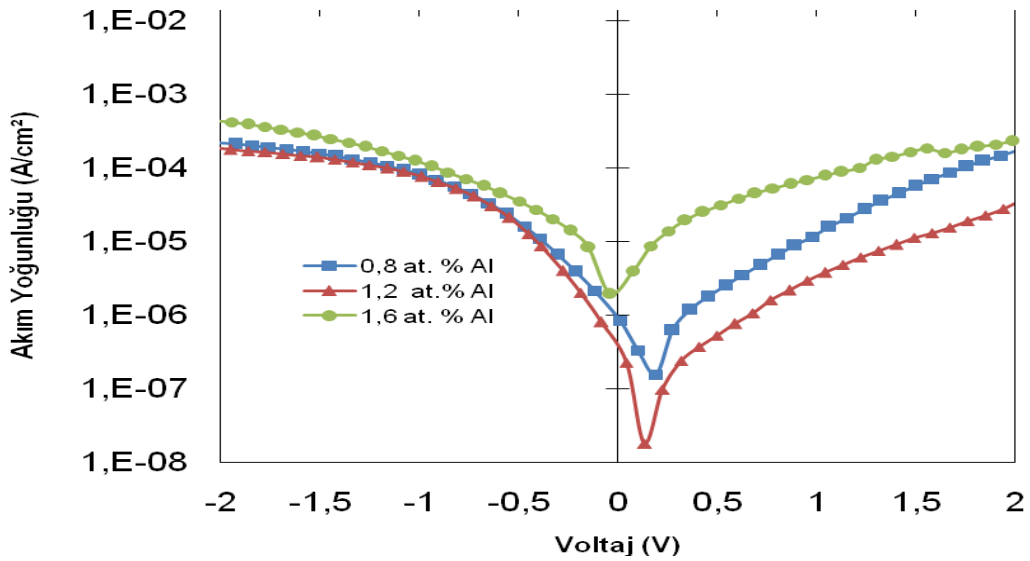


Şekil 6.18 :Farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki I-V karakteristikleri

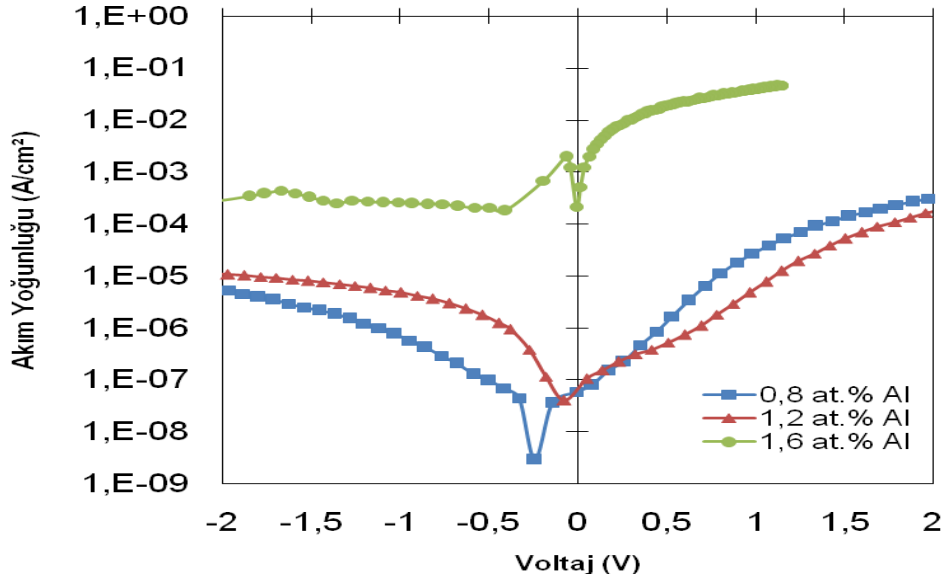


Şekil 6.19 : Farklı Al konsantrasyonlarındaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki I-V karakteristikleri.

Al konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak 700 °C’de vakum ortamında tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.20’de arz edilmiştir. Farklı Al konsantrasyonlarında 700 °C’de vakum ortamında tavllanmış ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.21’de arz edilmiştir.

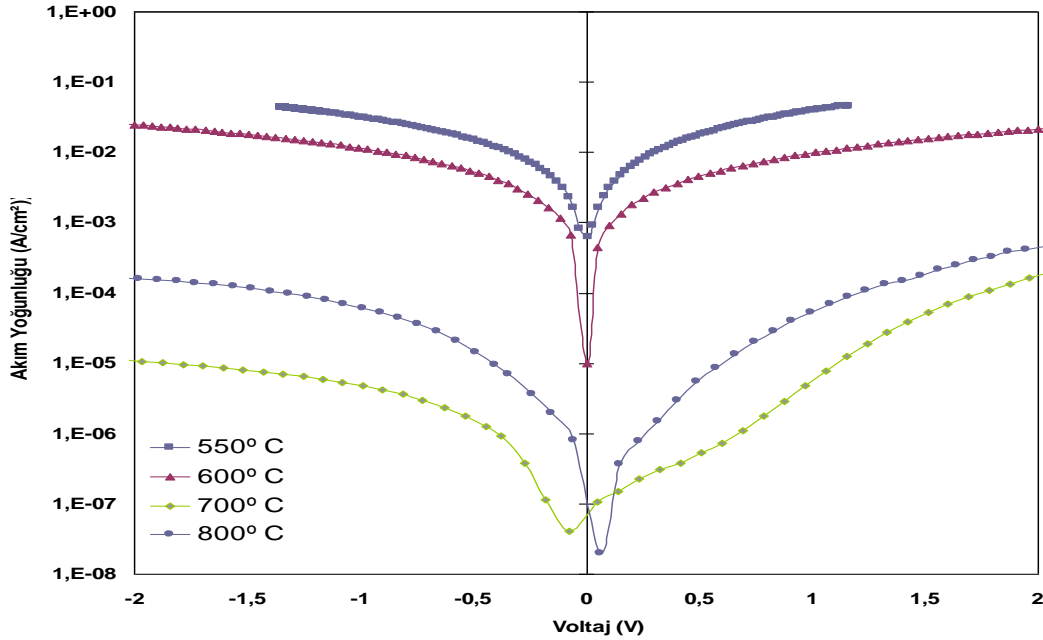


Şekil 6.20 : Farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri

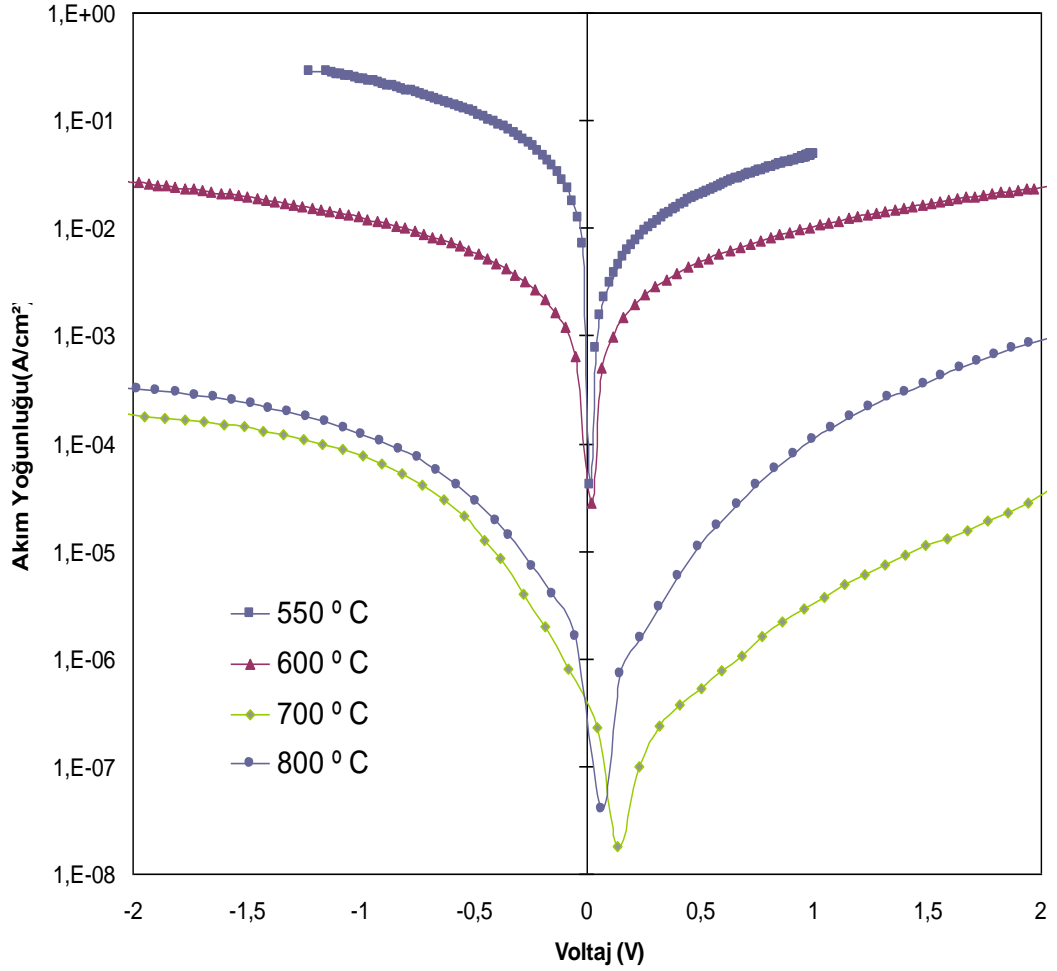


Şekil 6.21 : Farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.

Tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak 1.2 at. % Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.22’de arz edilmiştir. Farklı tavlama sıcaklıklarında tavllanmış 1.2 at. % Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.23’de arz edilmiştir.



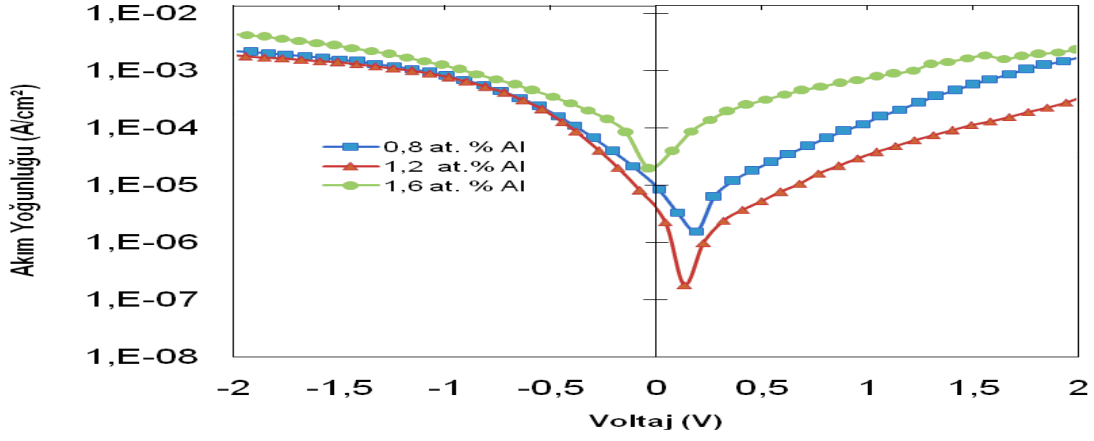
Şekil 6.22: Farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.



Şekil 6.23 : Farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.

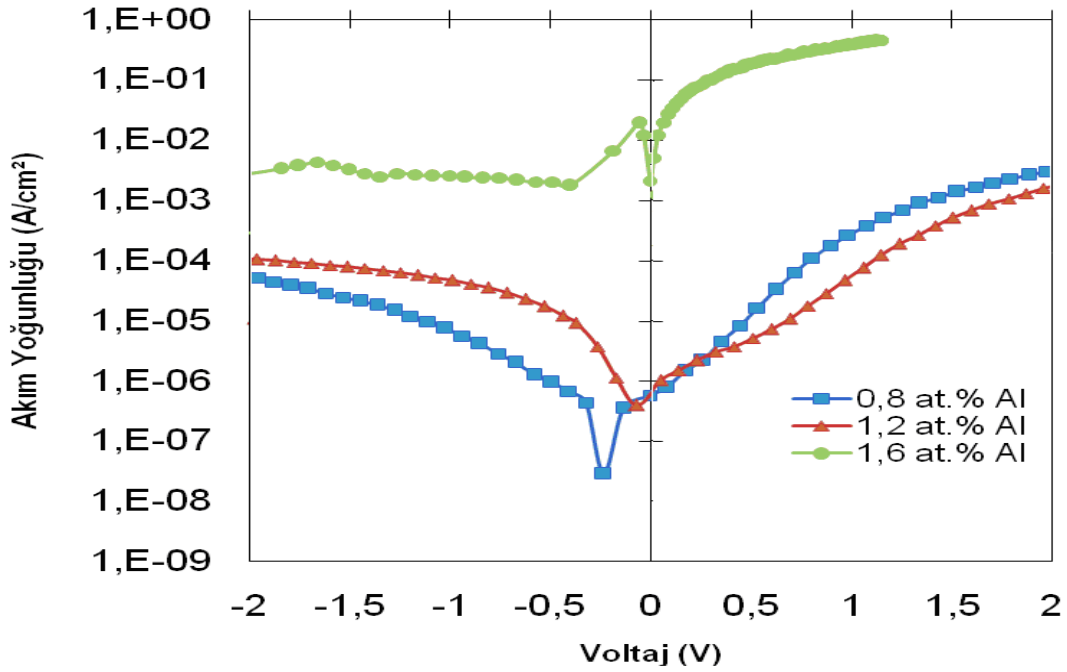
6.4 Reaktör Nötronlarına Maruz Kalmış ZnO:Al/p-Si İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinde Oluşan Değişimlerin Mukayeseli Olarak İncelenmesi

İTÜ TRİGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün Termal kolonundaki termal nötronlara maruz bırakılan, Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki heterokavşakların, akım yoğunluğu voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler incelenmiştir. Bu değişimleri değerlendirmek için farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.24'de arz edilmektedir.



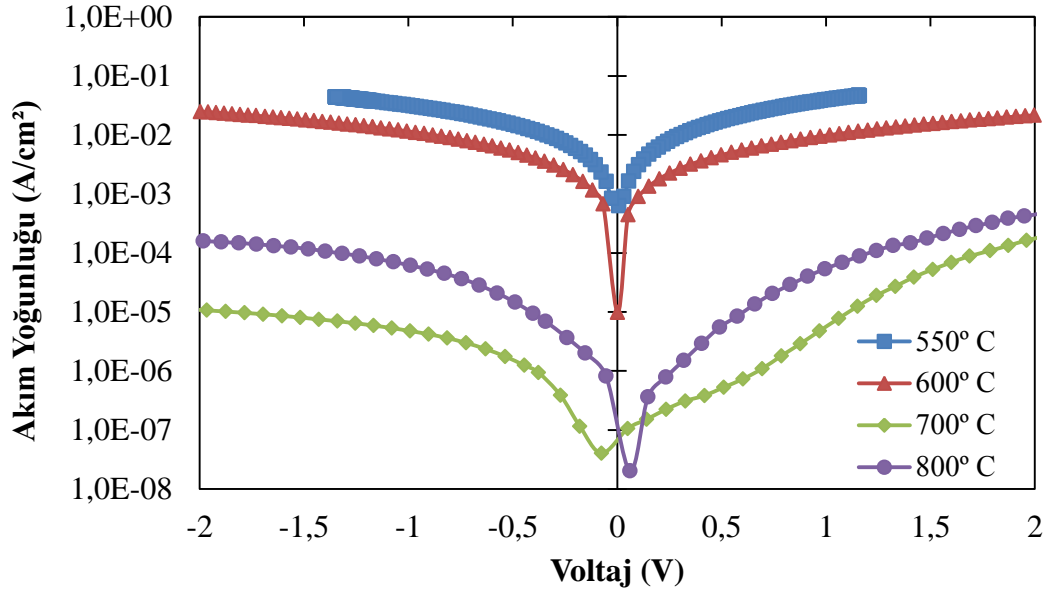
Şekil 6.24 : Reaktör nötronlarına maruz kalmış, farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.

Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.25’de arz edilmiştir.



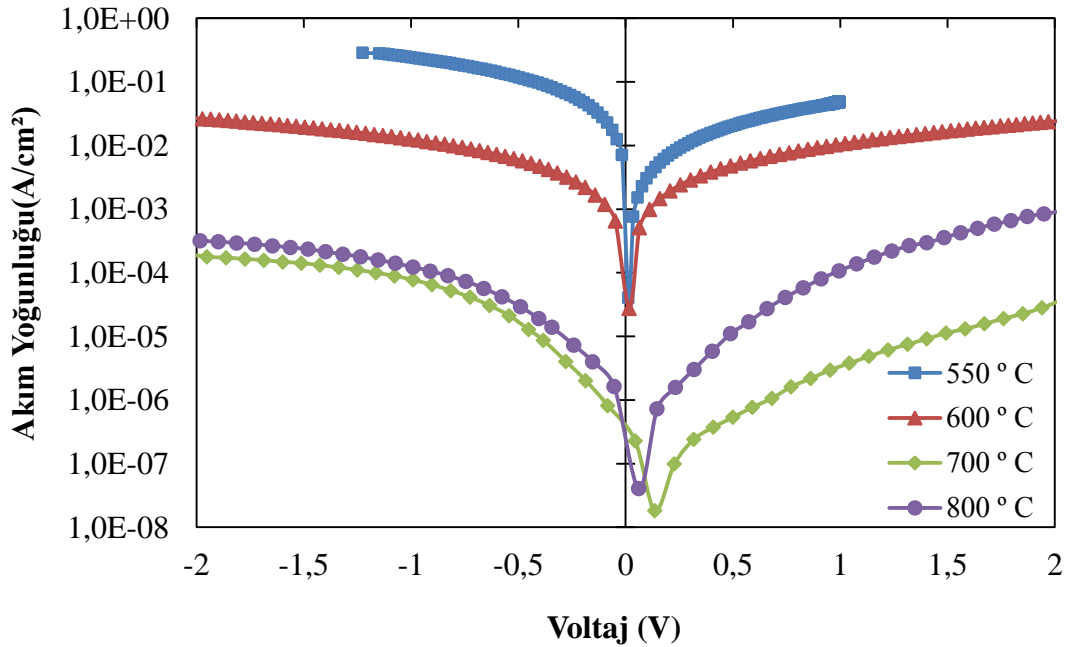
Şekil 6.25 : Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı Al konsantrasyonundaki ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamdaki akım yoğunluğu-voltaj değişimleri

Reaktör nötronlarına maruz kalmış, farklı sıcaklıklarda vakum ortamda tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamlarda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.26’da arz edilmektedir.



Şekil 6.26 : Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların karanlık ortamda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri

Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamlarda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri Şekil 6.27’de arz edilmektedir.



Şekil 6.27 : Reaktör nötronlarına maruz kalmış farklı sıcaklıklarda vakum ortamında tavllanmış 1,2 at. % Al katkılı ZnO:Al/p-Si heterokavşakların aydınlık ortamlarda akım yoğunluğu-voltaj değişimleri.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında n-tipi yarı iletken ince filmlerden olan Al katkılı ZnO (ZnO:Al) ince filmlerin termal nötronlar karşısında elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, ZnO:Al ince filmler sol-gel daldırarak kaplama yöntemi kullanılarak elektriksel iletken ince film olarak ekonomik bir şekilde üretilmiştir. ZnO:Al ince filmlerin Al konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler değerlendirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca dört farklı tavlama sıcaklığında tavlanan ince filmlerin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimler değerlendirilmiştir.

Üretilen tüm ince filmler, İTÜ TRİGA Mark-II Eğitim ve Araştırma Reaktörü'nün Teğetsel Işınlama Tüpünde termal nötronlara maruz bırakılmıştır. Işınlama sonrasında, söz konusu oluşan değişimler mukayeseli olarak incelenmiştir. Bu amaçla üretilen ince filmlerin Al konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak elektriksel özelliğinde oluşan değişimler 0.8, 1.0 , 1.2 ve 1.6 at. % Al konsantrasyonunda olmak üzere dört farklı Al konsantrasyonunda incelendiğinde, 1.2 Al konsantrasyonundaki filmlerin elektriksel iletkenliğinin bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, 1.2 at.% Al konsantrasyonunda üretilen ince filmler 550, 600, 700 ve 800 C'de olmak üzere dört farklı sıcaklıkta tavlanaarak tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elektriksel özelliklerinde en yüksek değişim 700 C'de tavlanan ince filmlerde tespit edildiğinden farklı Al konsantrasyonunda üretilen ince filmler bu tavlama sıcaklığında tavlanaarak ayrıca incelenmiştir.

Reaktör nötronlarına maruz kaldıktan sonra, ZnO:Al ince filmlerin yüzey dirençlerinde oluşan değişimler incelendiğinde nötronlara maruz kalan filmlerin yüzey dirençlerinde bir miktar azalma oluştuğu tespit edilmiştir. Işınlama süresi 3 saatten ~ 7 saate kadar çıkarıldığında elektriksel direncin de eksponansiyel şekilde bir miktar daha azalma oluştuğu tespit edilmiştir. Termal nötronlara maruz bırakılan film yüzeyindeki elektriksel iletkenliğe termal nötronların bir katkı sağladığı

düşünülmüştür. Nötronların film yüzeyindeki atom çekirdeği ile çarpışması neticesinde oluşan radyasyon kusurları sonucunda film yüzeyinin elektriksel direncinde bir miktar azalma olduğu tespit edilmiştir.

Cu/ZnO:Al/p-Si/Al konfigürasyonundaki heterokavşakların Akım-Voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler incelenmiştir. Tavlama sıcaklığında ve Al konsantrasyonuna bağlı olarak, Akım yoğunluğu – Voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 1.2 at. % Al konsantrasyonunda üretilip 700 C’de tavlananların diğerlerine göre elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle 1.2 at. % Al konsantrasyonunda üretilip 700 C’de tavlanan ZnO:Al/p-Si heterokavşakların daha nitelikli diyot özelliği oluşturduğu tespit edildiğinden özellikle bu ince filmler nötronlara maruz bırakılarak detaylı olarak incelenmeye çalışılmıştır.

Reaktör nötronlarına maruz kalmadan önce, 3 saat ve yaklaşık 7 saat süresince termal nötronlara maruz kaldıktan sonra Akım Yoğunluğu - Voltaj karakteristiklerinde oluşan değişimler mukayeseli olarak incelenmiştir. Bu oluşan değişiklikler aydınlık ve karanlık ortamda karşılaştırılmıştır. Nötronlara maruz kalan ZnO:Al/p-Si heterokavşakların akım yoğunluğunda bir miktar artış olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akcan, D.**, 2013, İletken $Zn_{1-x}Mg_{0.05}Al_xO$ İnce Filmlerin Radyasyon Karşısındaki Davranışlarının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, İstanbul.
- Bardakçı, S.**, 2007 Sol Jel Yöntemiyle Hazırlanan TiO_2 İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 72s, Sakarya.
- Baydoğan N., Tuğrul A.B.**, 2013, Dose depth and penetration of light dependence in the irradiated optical glass by reactor neutrons *Optical Materials*, 36 (2013) 489–494)
- Bau, D.**, Gu, H. and Kuang, A. 1998 Sol-Gel Drived C-Axis Oriented ZnO Thin Films. *Thin Solid Films*, 312, 37-39.
- Bilge, A.N., Tuğrul A.B.**, 1990, Endüstriyel Radyografinin Esasları, *İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi*, İstanbul.
- Boztoprak, Y.**, Kahraman, M., Kayaman, A., Güngör, A., 2007. Sol-Jel Tekniğiyle Kaplanan Polikarbonatların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı, 7-9 Kasım, İstanbul.*
- CPEP**, 2003, Nuclear Science—A Guide to the Nuclear Science Wall Chart 2003 *Contemporary Physics Education Project.*
- Dikici, M.**, 1993. Katıhal Fiziğine Giriş. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yayınları*, 273s, Samsun.
- Bahar, M.K.**, 2007. P-Tipi δ -Katkılı GaAs Yapıların Elektronik Özellikleri. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 49s, Sivas.
- Ebers, J.J.**, 1952, “Four-Terminal p-n-p-n Transistors,” *Proc. IRE*, 40, 1361– 1364.
- Eserci, D.**, 2007. Alümina, Zirkonya Ve Alümina-Zirkonya Kompozit Malzeme Üretimi, Karakterizasyonu ve Etkin Difüzyon Sabitinin Bulunması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Ankara.

- Efendiler, H.**, 2006. TiO₂ İnce Filmler İle Kaplanmış Yüzeylerin Staphylococcus aureus' a Karşı Fotokatalitik Bakterisidal Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, 220s, İzmir.
- Evcin, A.**, 2006, Sol-Jel Proseslerine Giriş Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Gonzales, A.E.J.**, Urueta, J.A.S. and Parra, R.S. 1998. Optical And Electrical Characteristics of Aluminum-Doped ZnO Thin Films Prapered by Sol gel Technique. *Journal of Crystal Growth*, 192, 430-438.
- Görür, Ş.**, 2006, Çevresel Radyoaktivite ile Bu Çevrede Yaşayanlara Ait Dış Örneklerdeki Radyoaktivite Ararsındaki İlişkinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Adana.
- Grundmann, M.**, 2010The Physics of Semiconductors An Introduction Including *Nanophysics and Applications Second Edition*, Giriş S. 1.
- Hasançebi Ö.**, 2006, Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Bakır Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi,126s, Ankara.
- L'Annunziata M. F.**, 2004 Handbook of Radioactivity Analysis, Nuclear Radiation, Its Interaction With Matter And Radioisotope Decay, *Worldtech International Technical Services*.
- Leroy, C.**, 2010, Radiation interaction with matters and principles of detection.
- Lisa C. Klein**, 1988. Sol-Gel Technology for Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics and Specialty Shapes, ISBN 0-8155-1154-X *Noyes Publication*, p.52
- Moll, J.L.**, Tanenbaum, M., Goldey, J.M. ve Holonyak, N., 1956, “*p-n-p-n Transistor Switches*,” Proc. IRE, 44, 1174–1182.
- Oral, D.**, 2012 Silisyum Tabanlı Organik-İnorganik Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu, Anadolu Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113 s, Eskişehir.
- Palalı, E.**, 2005, Sol-Jel Yöntemiyle İndiyum Kalay Oksit İnce Film Üretimi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Şanlıurfa.
- Sayıkan, F.**, 2007, Nano TiO₂ Fotokatalizör sentezi ve Fotokatalitik Aktivitesinin Belirlenmesi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 118 s, Malatya.

- Shockley, W.**, 1950 “Introductory Theory of Conductivity and Hall Effect” *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand Co. Inc., Princeton, New Jersey, 112.
- Silva, R.F.** and Zaniquelli M.E.D. 2002. Morphology of Nanometric Size Particulate Aluminium-Doped Zinc Oxide Films. *Colloids and Surface*, 198-200.
- Sönmezoğlu, S.**, Koç M., Akın S., İnce film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5):389-401, 2012.
- Spieler, H.**, Introduction to Radiation-Resistant Semiconductor Devices and Circuits.
- Şahin, L.**, 2010, Parçacıklar ve Radyasyonun Madde ile Etkileşmesi.
- Şener, D.** 2006 Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 62s, Ankara.
- Toplan, N.**, Sol Jel Metoduyla Amorf Malzeme Üretimi ppt ,2010.
- Tuğrul, A.B.**, 2012, Radyasyon Fiziği Ders Notları.
- UW Environmental Health and Safety** , 2006 Principles of Radiation Protection, Basic Radiation Physics, page 11-16.
- Vale, G.G.**, Hammer, P., Pulcinelli, S.H. and Santilli, C.V. 2004. Transparent And Conductive ZnO:Al Thin Films Prepared by Sol-Gel Dip-Coating. *Journal of the European Ceramic Society*. 24,1009-1013.
- Url-1** <w3.balikesir.edu.tr/~kahveci/dersler/te-04.pdf, s 56>
- Url-2** <http://www.bayar.edu.tr/besergil/5_yari_iletkenler.pdf>
- Url3** <<http://staff.neu.edu.tr/~jfathi/diyot.pdf>, s 74>

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Emrah GÜNAYDIN
Doğum Yeri ve Tarihi : GİRESUN / 1987
Lisans : YEDİTEPE ÜNİVERSİTESİ - Fizik Bölümü / 2010
Mesleki Deneyim : SIMON HEGELE/ SIEMENS HEALTHCARE – Servis Mühendisi / 2011 –

YAYINLAR

- ◆ **E. Gunaydin**, U. Canci Matur, N. Baydogan, A.B. Tugrul, H. Cimenoglu, S. Yesilkaya, “I-V Characterization of The Irradiated ZnO:Al Thin Film on p-Si Wafers by Reactor Neutrons” International Conference on Energy and Management, Istanbul, Turkey, June 5-7, 2014

PROJELER

- ◆ İTÜ BAP Yüksek Lisans Tez Projesi, “Nötronlara Maruz Kalan ZnO:Al/p-Si Heterokavşaklardaki I-V Karakteristiklerinin Değişimleri”.