

**AMORF SİLİSYUM BAZLI DİYOTLARDA
NEGATİF SİĞA ETKİSİ**

**2017
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK BÖLÜMÜ**

Aynur ANUTGAN

AMORF SİLİSYUM BAZLI DİYOTLARDA NEGATİF SIĞA ETKİSİ

Aynur ANUTGAN

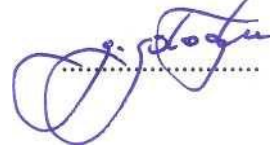
**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Aralık 2017

Aynur ANUTGAN tarafından hazırlanan “AMORF SİLİSYUM BAZLI DİYOTLARDA NEGATİF SIĞA ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU
Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 19/12/2017

Ünvanı. Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Kadir GÖKŞEN (DÜ)



Üye : Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Mustafa ERER (KBÜ)



..../
..../2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Aynur ANUTGAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AMORF SİLİSYUM BAZLI DİYOTLARDA NEGATİF SİĞA ETKİSİ

Aynur ANUTGAN

Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU
Aralık 2017, 50 sayfa

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemiyle hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) katkılanmamış tabakanın p- ve n-tipi katkılanmış hidrojenlenmiş nanokristal silisyum (nc-Si:H) tabakalar arasında üretilmesiyle elde edilmiş olan p-i-n diyotun elektriksel özellikleri incelenmiştir. Akım-gerilim ölçümleriyle diyottaki eklemleri oluşturan yapıların kaliteleri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Diyot ideallik faktörü, doğrultma faktörü ve akımın gerilime göre üstel davranışı p-i-n eklem yapısının standart kalitede olduğunu göstermiştir. Yarıiletken malzemelerdeki kusur seviyeleri hakkında nicel bilgi sunan admitans yöntemi, p-i-n diyot yapısında ileri besleme altında kullanılmıştır. Sığa-frekans-gerilim tayfında gözlenmiş olan negatif sığa etkisi makul bir eşdeğer devre ile matematiksel olarak MATLAB yazılımında altprogram yapısı kullanılarak modellenmiştir. Negatif sığa etkisinin eşdeğer devrede bobin kullanılarak benzetim yapılabildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda, başarılı bir benzetim için eşdeğer empedans değerine yüklenmesi gereken frekans bağımlılığı AC hopping iletişi ile bağdaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Hidrojenlenmiş amorf silisyum, p-i-n diyot, admitans, negatif sığa, AC hopping iletimi.

Bilim Kodu : 202.1.166



ABSTRACT

Master Thesis

NEGATIVE CAPACITANCE EFFECT IN AMORPHOUS SILICON BASED DIODES

Aynur ANUTGAN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Gökhan GÖKOĞLU

December 2017, 50 pages

The electrical properties of the p-i-n diode, obtained by producing hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) undoped layer between p- and n-type doped hydrogenated nanocrystalline silicon (nc-Si:H) by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), were investigated. By means of current-voltage measurements, an idea about the qualities of the structures that make up the junctions in the diode was obtained. The diode ideality factor, the rectification factor, and the exponential behavior of the current with respect to stress have been shown to be the standard quality of the p-i-n joint structure. The admittance method, which provides quantitative information about the defect levels in semiconductor materials, has been used under forward bias in the p-i-n diode structure. The negative capacitance effect observed in the capacitance-frequency spectrum is modeled using a mathematical subprogram structure in MATLAB software with a reasonable equivalent circuit. It has been shown that the negative capacitance effect can be simulated using the coil

in the equivalent circuit. At the same time, the frequency dependency, which must be loaded into equivalent impedance for a successful simulation, is correlated with AC hopping conduction.

Key Words : Hydrogenated amorphous silicon, p-i-n diode, admittance, negative capacitance, AC hopping conduction.

Science Code : 202.1.166



TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının yrtlmesinde ve oluşumunda desteğini esirgemeyen, ynlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillenmesine katkı sunan danıőman hocam sayın Prof. Dr. Gökhan GöKOğLU'na teőekkürlerimi sunarım.

Bu çalıőmada kullanılan malzemelerin üretilmesinde ve gerekli ölçümlerin alınmasında destek veren Doç. Dr. Mustafa ANUTGAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalıőması için gerekli malzemelerin temini için finansal destek veren Karabük Üniversitesi BAP Koordinatörlüęüne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. GENİŞ ALAN ELEKTRONİĞİ	1
1.2. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMA TARİHSEL YAKLAŞIM	3
BÖLÜM 2	7
HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMUM FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	7
2.1. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMUN TEMEL ÖZELLİKLERİ.....	7
2.2. KİMYASAL BAĞLAR	10
2.3. ENERJİ BANT YAPISI VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALAR İÇİN UYGUNLUK	12
2.3.1. Direkt Aralıklı Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler	13
2.3.2. Dolaylı Aralıklı Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler	14
2.3.3. Amorf Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler	14
2.4. YERELLEŞME, İLETİM VE MOBİLİTE KENARI	17
2.4.3. Fermi Seviyesi Civarında Hopping İletimi	20
2.5. YASAK ENERJİ ARALIĞINDAKİ KUSURLARIN AYGIT PERFORMANSINA ETKİLERİ	20
2.5.1. Amorf Fotoiletken Malzeme	20
2.5.2. Fotodiyot	21

	<u>Sayfa</u>
2.5.3. Işık Yayan Diyot (LED)	23
2.6. NEGATİF SIĞA ETKİSİ.....	25
BÖLÜM 3	27
DENEYSEL SÜREÇLER.....	27
3.1. ALTTABAN TEMİZLİĞİ VE ELEKTROT KAPLAMA	27
3.2. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUM P-İ-N DİYOT ÜRETİMİ	27
3.2.1. PECVD Sistemi	27
3.2.2. Amorf Yarıiletken Katmanların PECVD Sistemi İle Biriktirilmesi.....	30
3.3. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER	31
3.4. GERÇEKLEŞTİRİLEN DİĞER DENEYSEL FAALİYETLER	31
BÖLÜM 4	32
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	32
4.1. AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİĞİ	32
4.2. NEGATİF SIĞA KARAKTERİSTİĞİ	33
4.3. EŞDEĞER DEVRE DENEMESİ	36
4.3.1. MATLAB Curve Fitting Tool Araç Kutusu	38
4.3.2. MATLAB Altprogram Yapısı ile Matematiksel Modelleme	39
BÖLÜM 5	44
SONUÇ	44
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Hidrojenlenmemiş a-Si'nin enerji bant yapısı ve yasak enerji aralığının kusur seviyeleri ile doluluğu, a-Si'nin hidrojenlenmesi sırasında yasak enerji aralığı içerisindeki kusur seviyelerinin bant içlerine taşınması ve hidrojenlenme sonrasında yasak enerji seviyesi içindeki kusurların önemli ölçüde temizlenmesi ve a-Si:H yapısının oluşması.....	3
Şekil 2.1. Kristal ve amorf silisyumun bağlanma ve yapısal kusurlar bakımından karşılaştırılması	8
Şekil 2.2. Amorf malzemedeki elektronik durum yoğunluğunun enerjiye göre dağılımı	9
Şekil 2.3. Kristal katı, amorf katı ve gaz fazları için en yakın komşu atomun ortalama konumuna göre boyutlandırılmış ($R = R_{av}$) çift dağılım fonksiyonları	10
Şekil 2.4. Direkt aralıklı ve dolaylı aralıklı yarıiletkenlerde Enerji-Momentum eğrileri	13
Şekil 2.5. Amorf yarıiletken için enerji-bant yapısının gösterimi.....	16
Şekil 2.6. Amorf yarıiletkenin bant kenarı yakınlarında mobilite kenarı ile ayrılmış olan yerleşmiş ve uzanmış durumların görüldüğü Durum Yoğunlukları	18
Şekil 2.7. İki kuantum kuyusu ile betimlenen iki yerleşmiş durum arasında gerçekleşen kuantum tünelleme olayı.	18
Şekil 2.8. Bant aralığı içerisinde kusur seviyelerinin bulunduğu bir fotoiletkende taşıyıcı uyarılmasının, iletiminin, tuzaklanmasının ve yeniden uyarılmasının şematik gösterimi.	21
Şekil 2.9. Eş-eklemlili p-i-n diyot yapısında fotovoltajik etki ile oluşan kararlı hal elektron ve hol akımlarının şematik gösterimi; bant aralığındaki tuzak seviyelerinin oluşan fotoakıma olumsuz etkisi	23
Şekil 2.10. Eş-eklemlili bir p-i-n LED yapısının ileri besleme altındaki akım iletimini, taşıyıcı termalizasyonunu, taşıyıcı tuzaklanmasını ve ışımalı-ışımatsız birleşme olgularını gösteren şematik çizim	24
Şekil 3.1. Tezdeki diyotların üretiminde kullanılan PECVD sisteminin şematik görünümü	29
Şekil 3.2. Tez kapsamında kullanılan a-Si:H p-i-n diyodun şematik yan kesit görüntüsü.....	31
Şekil 4.1. a-Si:H p-i-n diyot Akım-Gerilim karakteristiği.	32

Şekil 4.2. a-Si:H p-i-n diyotun değişik gerilimlerdeki Sığa-Frekans karakteristiği.....	35
Şekil 4.3. Seri direnç ile p/i ve i/n arayüzlerindeki devre elemanlarının gösterildiği MATLAB benzetim algoritmasında kullanılan eşdeğer devrenin p- ve n-tipi bölgelere karşılık gelecek şekilde iki ayrı empedans ile gösterilmesi.	37
Şekil 4.4. Herhangi bir veri kümesinin basit matematiksel denklemlerle modellenebildiği MATLAB Curve Fitting Tool arayüzü.	39
Şekil 4.5. İçi boş yuvarlaklar belirli bir ileri besleme altında ölçülen sığa-frekans verisi, düz çizgi eşdeğer devre modelinin deneysel veriye oturtulması ve MATLAB’da tanımlanan eşdeğer devre modelindeki direnç değerlerinin Hopping modeline uygun olacak biçimde frekansa bağlı seçilmesi.....	41
Şekil 4.6. Eşdeğer devrede bobin kolunun devre dışı bırakıldığı durumdaki matematiksel modelin deney verilerinden farklılığı.	42
Şekil 4.7. Eşdeğer devredeki devre elemanlarının frekans bağımlılıklarının iptal edilmesi durumunda elde edilen en iyi benzetim.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Tezde kullanılan a-Si:H p-i-n diyotların üretim parametreler 30



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

H	: Hidrojen
Si	: Silisyum
a-Si	: Amorf Silisyum
x	: Konum
P	: Momentum
h	: Plank sabiti
μ	: Mobilite
τ	: Saçılma zamanı
L	: Ortalama serbest yol
v	: Taşıyıcı ısıt hızı
k	: Boltzman sabiti

KISALTMALAR

PECVD	: Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme)
CB	: Conduction Band (İletim Bandı)
VB	: Valens Bandı
TFT	: Thin Film Transistor (İnce-Film-Transistör)
CRN	: Continuous Random Network (sürekli rastgele ağ)
LED	: Light-Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
OLED	: Organic Light-Emitting Diode (Organik Işık Yayan Diyot)
LCD	: Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. GENİŞ ALAN ELEKTRONİĞİ

Modern elektronik teknolojisini mikroelektronik ve geniş alan elektroniği olmak üzere iki ana kola ayırmak mümkündür. Mikroelektronik teknolojisini oluşturan aygıtlar işlem hızını ve çalışma verimini arttırmak üzere sürekli daha küçük boyutlarda üretilme eğilimindedir. Öyle ki, 1965 yılında yapılan istatistiklerde öngörülen davranışa göre birim alandaki transistör sayısı her 2 yılda 2 katına çıkmaktadır [1]. Bu davranışa Moore Yasası denir. 2015 yılı itibariyle 14 nm kapı genişliğine sahip transistörler entegre devrelerde üretilmektedir [2]. Mikroelektronikteki akıl almaz minyatürleşmeye karşın, geniş alan elektroniği yüzeye gelen foton miktarının (güneş panelleri, tarayıcılar, x-ışını görüntüleme uygulamaları için) ve yüzeyden çıkan foton miktarının (ekran ve aydınlatma birimleri için) yüksek seviyede olması ve insan-makine arayüzünün etkin bir biçimde oluşturulabilmesi için olabildiğince geniş yüzeylere üretimi gerektirmektedir.

Günümüzde entegre devreler tek kristal silisyum pul üzerine çeşitli litografi süreçleri sonucunda üretilmektedir. Mevcut Si külçe üretim tekniği ile; yani Czochralski, Yüzen Bölge (Floating Zone); en fazla 30 cm'lik Si pullar üretilmektedir. Ancak, bu pulların kenar bölgelerinde görülen kristal yönelimlerindeki farklılık sebebiyle endüstride daha çok 20 cm çapındaki Si pullar tercih edilmektedir.

Elektronik devrelerin üzerine üretildiği Si pullardaki bu boyut sınırlaması zaten minyatürleşmekte olan mikroelektronik teknolojisi için bir sorun teşkil etmemektedir. Lakin olabildiğince geniş yüzeylere üretimi gerektiren geniş alan elektroniği aygıtları için 20 cm'lik alt taban çapı çok ufak kalmaktadır. Buna alternatif olarak, geniş boyutta üretiminde bir engel bulunmayan alt tabanların seçimi

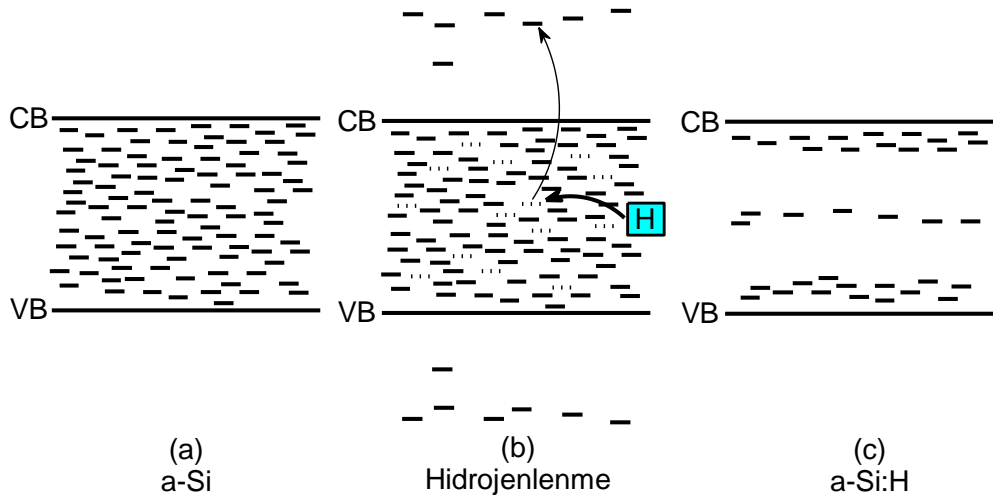
tercih edilebilir. Bu kadar geniş boyutlarda kristal üretimi için pratik bir yöntem henüz olmadığından bu geniş yüzeyli alt tabanlar amorf yapıda seçileceklerdir. Amorf alt tabanlar aynı zamanda üretimi çok ucuz olan malzemelerdir. Böylece üretilecek olan elektronik birimlerin maliyetlerinde de buna bağlı bir düşüş beklenebilir. Buna karşın, mikroelektronikte kullanılan üretim aşamaları 900 °C ve üzeri sıcaklıklarda uygulanan süreçleri içermektedir ki bu yüksek sıcaklıklarda geniş alan elektroniğinde kullanılacak amorf alt tabanlar katı-hallerini muhafaza edemezler. Dolayısıyla, geniş alan elektroniğindeki elektronik devre elemanları, üzerine üretilecekleri alt tabanın erime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklardaki işlemlere tabi tutulmalıdırlar. Üretim maliyeti düşük ve pratik geniş alan uygulamaları için boyut sınırlandırması olmayan adi cam (ör. Pencere camı, mikroskop camı, vb.) alt taban olarak kullanılacaksa elektronik elemanların üretim sıcaklığı yaklaşık 400 °C'yi geçmemelidir.

Ancak bu sıcaklığın altındaki değerlerde elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanılan klasik fırınlama yöntemleri (yani; katkılama, oksit kaplama, epitaksiyel üretim, vb.) geçerliliğini yitirmektedir. Çünkü aygıt üretimi sırasında malzemelerin kimyasal reaksiyonları gerçekleştirmek üzere ihtiyaç duydukları aktivasyon enerjisinin fırın sıcaklığının sağladığı ısı ile karşılanması gerekir. Genel olarak 400 °C'lerin üzerine çıkılmasına izin verilmeyen geniş alan elektroniği üretim aşamalarında bu aktivasyon enerjisi ısı ile karşılanamaz. Bunun yerine, plazma destekli üretim sistemleri kullanılarak elde edilmesi planlanan malzemenin üretiminde yer alacak olan kimyasal bileşenler iyonlaştırılarak yüksek hızla alttaban üzerine yönlendirilebilirler. Böylece, ısı ile karşılanamayan aktivasyon enerjisi reaktif iyonların plazma ortamında oluşturulması ve bu iyonlara sağlanan kinetik enerji ile karşılanmış olur.

Üretilecek malzemedeki kimyasal bileşenleri içeren gaz moleküllerinin iyonlaştırılması ve plazma ortamının oluşturulması neticesinde alt taban üzerine hızlandırılan yüzsek hızlı reaktif iyonların kullanılması ile düşük sıcaklıklarda geniş yüzeylere elektronik aygıt üretimine olanak sağlayan yöntemle Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; PECVD); bu yöntemin kullanıldığı üretim sistemine de PECVD sistemi denir [3].

1.2. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMA TARİHSEL YAKLAŞIM

Amorf yarıiletkenler üzerine araştırmalar kalkojenitler ile başlamıştır. Çeşitli optik aygıtlarda kullanılan malzemelerden olan kalkojenitler, bir kalkojen (6A Grubu elementi) ile elektropozitif bir elementten oluşan ikili bileşiklere verilen isimdir; örneğin SiO_2 . Hidrojenlenmiş amorf silisyum ($\alpha\text{-Si:H}$) yarıiletken uygulamalar için 1950'lerde çalışılmaya başlanmıştır. Burada hidrojenin özellikle vurgulanmasının nedeni hidrojen kullanılmadan üretilen amorf silisyum optoelektronik uygulamalar açısından vasat bir malzeme iken hidrojenlenerek üretilen amorf silisyumdaki elektronik kusur yoğunluğu aygıt üretimine izin verecek kadar azaltılabilmektedir. Şekil 1.1-a'da $\alpha\text{-Si}$ 'nin hidrojenlenme öncesindeki enerji bant diyagramı gösterilmiştir. Yasak enerji aralığı olarak nitelenen iletim bandı (CB) ve valens bandı (VB) arasındaki bölge yapısal kusurlardan dolayı yerleşmiş enerji durumları ve derin tuzaklarla doludur. Bu doluluk, yük taşıyıcılar için bant içindeki enerji seviyeleri ile yasak enerji aralığındaki enerji seviyeleri arasındaki ayrımı ortadan



Şekil 1.1. a) Hidrojenlenmemiş $\alpha\text{-Si}$ 'nin enerji bant yapısı ve yasak enerji aralığının kusur seviyeleri ile doluluğu. b) $\alpha\text{-Si}$ 'nin hidrojenlenmesi sırasında yasak enerji aralığı içerisindeki kusur seviyelerinin bant içlerine taşınması. c) Hidrojenlenme sonrasında yasak enerji seviyesi içindeki kusurların önemli ölçüde temizlenmesi ve $\alpha\text{-Si:H}$ yapısının oluşması.

kaldırmaktadır. Dolayısıyla, yük taşıyıcılar, herhangi bir eşik değeri olmaksızın tüm dış uyarmalara yanıt vermekte ve üst enerji seviyelerine uyarılmaktadırlar. Üst enerji

seviyelerindeki taşıyıcılar ise, herhangi bir optik sinyal üretmeksizin, yalnızca fonon emisyonu yaparak alt enerji seviyelerine termalizasyon adı verilen geçiş yapmaktadırlar. Bunları göz önüne aldığımızda, hidrojenlenmemiş a-Si'nin optoelektronik uygulamalar açısından vasat bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 1.1-b'de a-Si'nin hidrojenlenmesi ve yasak enerji aralığı içindeki kusur seviyelerini bant içlerine taşınması şematik olarak resmedilmiştir. Örneğin, hidrojenlenme olmadığında kopuk olan bir Si- bağı bant aralığının orta bölgelerinde derin bir tuzak oluştururken, hidrojen ile buluşması sonrasında H atomu tarafından yaklaşık 3.4 eV'luk bir enerji ile yakalanarak Si-H yapısı oluşturur ve bu sayede bant içine yerleşirler. Sonuç olarak malzeme, yasak enerji aralığında yer alan bir kusur seviyesinden arındırılmış olur. a-Si'nin hidrojenlenme işlemi kusur seviyelerindeki temizlenme işlemi vurgulamak amacıyla şematik gösterimde sanki üretim sonrasında gerçekleştirilen ayrı bir işlem gibi resmedilmiştir. Ancak, bu işlemin üretim sırasında kullanılan H₂ gazı veya H atomu içeren bir gaz kullanılarak gerçekleştirildiği unutulmamalıdır. Şekil 1.1-c'de hidrojenlenmiş a-Si'nin, yani a-Si:H'nin enerji bant diyagramı görülmektedir. Hidrojenlenmenin etkisiyle artık a-Si:H'nin yasak enerji aralığı önemli ölçüde kusurlardan temizlenmiş ve malzeme optoelektronik uygulamalar için uygun hale gelmiştir.

a-Si:H üretiminde kullanılan iki yöntem vardır: saçtırma ve PECVD, ki sonraki yöntem daha reaktif bir ortamda, ortamın hidrojen ile boğdurulması sonucunda yapıya hidrojenin daha etkin bir biçimde katılabilmesini ve çok daha kaliteli ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Arzu edilmeyen ancak amorf silisyumda bolca bulunması muhtemel bu kusurlar fotoiletkenliği, katkılamayı ve diğer başka önemli yarıiletken özelliklerini olumsuz etkilemektedirler.

a-Si:H endüstriye iki temel avantaj getirmektedir. İlk olarak, geniş yüzeylere üretilebildiklerinden ekonomiktir. İkinci olarak ise, tek kristal Si ile karşılaştırıldığında a-Si:H daha düzensiz ve kusurlu bir yapıya sahip olsa da, buna karşın daha üstün fotoiletkenlik özellikleri sergilemektedir.

a-Si:H'nin elektronik uygulamalardaki uygulanabilirliği ilk olarak 1969 yılında Birleşik Krallık'tan Chittick ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur [4]. Silan

gazının (SiH_4) plazma ortamında iyonlaştırılması ve elektrik alan altında hızlandırılması sonucunda bir alttaban üzerine kusur yoğunluğu düşük ve fotoiletkenlik özellikleri yüksek a-Si:H üretimi mümkün olmuştur. Daha sonra Si-H bağlarındaki kızılötesi titreşimleri de gözlemleyen grubun çalışmaları sponsorlardan gelen maddi desteğin kesilmesi sonucunda yarıda kalmıştır [5].

a-Si:H'nin ilk üretimlerinden elde edilen sonuçlar İskoçya'nın Dundee Üniversitesi'nden Spear ve takımı tarafından ilgi gördü. Spear'ın Chittick'in üretim sistemini Dundee'ye getirmesinden birkaç yıl sonra, Dundee Üniversitesi'ndeki grup amorf silisyumun o zamana dek bilinmeyen bazı özelliklerini keşfetti [6]. Grup, a-Si:H'nin elektrik iletim özelliklerinin iyi seviyede ve taşıyıcı mobilitesinin yüksek olduğunu gösterdiler. Aynı zamanda, fosfin (PH_3) ve diboran (B_2H_6) gazları kullanılarak a-Si:H'nin sırasıyla n tipi ve p tipi katkılanması da yine aynı grup tarafından başarılmıştır [6,7]. Bu gelişmelerden sonra a-Si:H üzerine yapılan akademik çalışmaların yoğunluğu artmıştır.

Harvard Üniversitesi'nden amorf silisyum ve amorf germanyum üzerine uzmanlaşan Paul ve arkadaşları amorf silisyuma hidrojen eklemenin önemi üzerine çalışmışlardır [8]. Bu grup, a-Si'nin (hidrojenlenmemiş) içerdiği yüksek kusur yoğunluğu neticesinde elektronik özelliklerinin vasat olduğunu ve üretim için kullanmış oldukları saçtırma sistemine hidrojen gazı sağladıklarında kusur yoğunluğunun ciddi derecede azaltıldığını gösterdiler. Ek olarak, IR titreşimlerinin analizi ile yapıdaki hidrojen miktarının %10 civarında olduğu da bu grup tarafından belirtilmiştir.

Birkaç yıl içerisinde, a-Si:H aygıt uygulamalarında denenmeye başladı. Carlson ve Wronski tarafından 1976 yılında RCA laboratuvarlarında ilk defa a-Si:H kullanılan Fotovoltaik aygıt üretildi [9]. İlk üretilen a-Si:H güneş hücreleri %2-3 civarında dönüşüm verimliliğine sahipti. 1979 yılında Japonya'da Sanyo firması a-Si:H güneş pillerini üretmeye başladı ve bunları piyasaya sürdü. a-Si:H her ne kadar düşük maliyetli bir üretim imkanı sunsa da bu malzeme kullanılarak üretilen güneş pillerinin enerji verimliliği kristal Si ile üretilenlere göre daha düşüktür.

İlk a-Si:H alan etkili transistorün (ince-film-transistör, TFT) 1981’de Snell ve arkadaşları tarafından rapor edilmesinin ardından geniş alan elektronik dizileri üzerine araştırmalar da başlamıştır [10]. Bu alışma, řu an ekran teknolojisinde piyasaya tartışmasız hâkim olan TFT-LCD, TFT-LED, TFT-OLED panelleri ile diğer geniş alan elektroniği aygıtları olan optik tarayıcılar ve radyasyon görüntüleme sistemlerinin de temelini oluşturmaktadır.



BÖLÜM 2

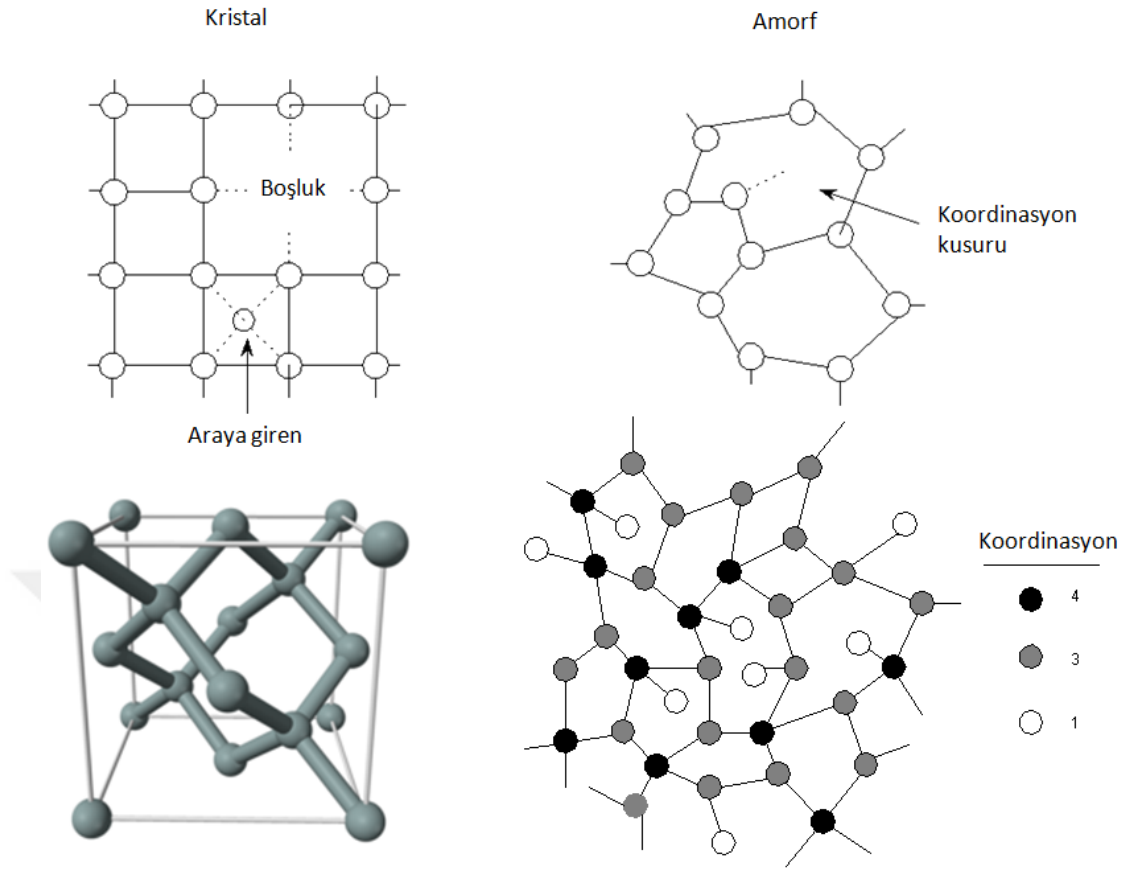
HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMUN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

2.1. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUMUN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Amorf ve kristal Si bağ yapıları bakımından farklılık göstermektedir (Şekil 2.1). Kristal Si'deki mükemmel bir periyodik dizilim gösterirken, a-Si:H bir miktar kısa menzilli düzeni göz ardı edersek düzensiz bir bağ yapısına sahiptir. a-Si:H'nin sahip olduğu bu düzensiz atomik yapı sayesinde kristal versiyonuna kıyasla değişik elektronik ve optik özellikler sergilemektedir. Yasak enerji aralığında elektronik durum yoğunluğuna (DOS) yol açan amorf yapıdaki bu düzensizlikler atomik bağlardaki uzunluk ve açı değişimlerinden kaynaklanmaktadır.

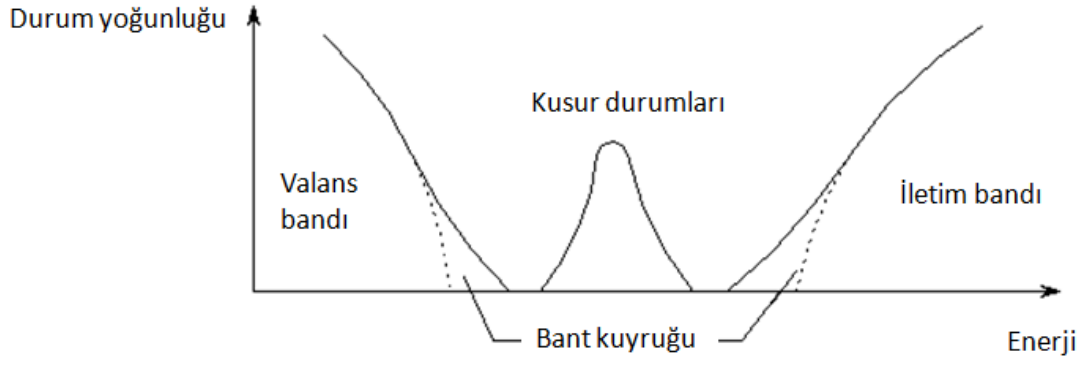
Yarıiletken bir malzemeyi elektronik uygulamalarda kullanışlı kılan en önemli özellik katkılanabilir olmasıdır. a-Si:H üzerine elektronik temelli araştırmaları 1970'lerden sonra yoğunluk kazanmasındaki etken yukarıda (Bölüm 1.2) bahsedildiği gibi a-Si:H'nin katkılanabilmesinin 1975 yılında başarılmasıdır. Katkılama bir yarıiletkene yabancı atomlar ekleyerek onun yalnızca iletkenliğinin artırılması olayı değildir. Eğer amaç sadece iletkenlik arttırmak olsaydı, zaten hali hazırda iletkenliği yüksek olan malzemeler (metaller) kullanılırdı. Ancak, katkılama ile yarıiletkenin iletkenlik derecesinin artırılmasının yanı sıra yarıiletkenden geçen akımı taşıyacak olan yük taşıyıcıların tipi de belirlenmektedir. Metallerde yalnız elektronlar ile eksi yük taşınımı sağlanır; yarıiletkenlerde ise n-tipi katkılamada eksi yüklü elektronlar, p-tipi katkılamada artı yüklü holler elektriksel iletimi sağlarlar.

Aslında hol fiziksel bir yük taşıyıcı değildir; bir bölgede elektron eksikliği var ise sanki o bölgede bir artı yük varmış gibi yaklaşım yapılır ki tüm davranış artı yük taşıyıcı kavramı üzerinden daha pratik bir biçimde açıklanabilir.



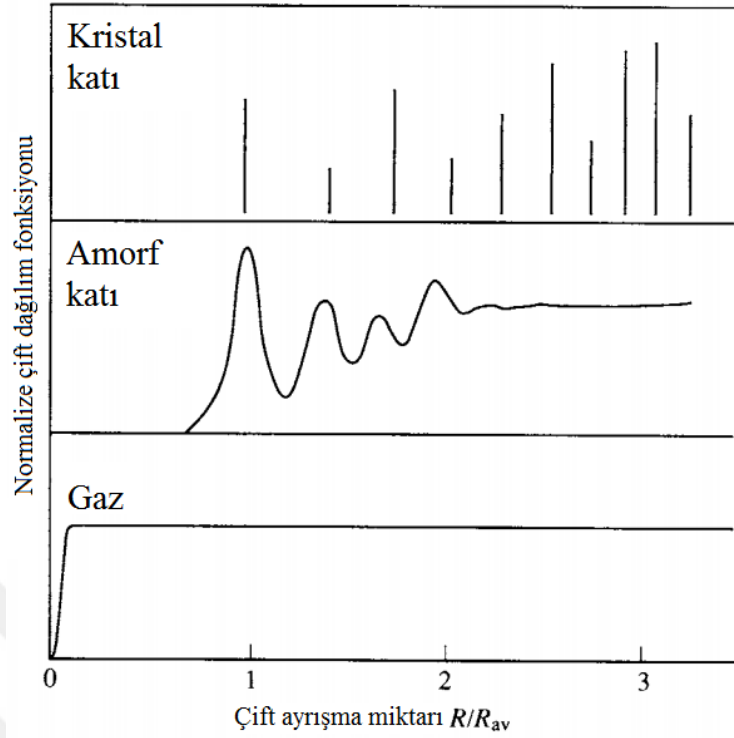
Şekil 2.1. Kristal ve amorf silisyumun bağlanma ve yapısal kusurlar bakımından karşılaştırılması [11].

Amorf malzemede koordinasyon kusurları olarak adlandırılan kopuk bağlar yasak enerji aralığının orta bölgesinde elektronik enerji seviyeleri oluştururlar (Şekil 2.2). Kopuk olmayan bağlardaki açı ve uzunluk farklılıkları ise enerji bantların yasak enerji aralığına bakan kıyı bölgelerinde bant kuyukları denilen enerji seviyelerini oluştururlar (Şekil 2.2). Yasak enerji aralığındaki enerji seviyelerinin (ya da durum yoğunluğunun) bu dağılımı amorf yarıiletkenin temel özelliklerini belirlemektedir.



Şekil 2.2. Amorf malzemedeki elektronik durum yoğunluğunun enerjiye göre dağılımı.

Atomik bağların düzeni hakkında bilgi sunan çift dağılım fonksiyonları kristal katı, amorf katı ve gaz fazları için Şekil 2.3'te sunulmuştur. Şematik olarak gösterilen çift dağılım fonksiyonları bir atomun en yakın komşu atomun ortalama uzaklığına (R_{av}) göre R uzaklığında bulunma olasılığını verir. Normalize çift dağılım fonksiyonları a-Si:H ve kristal Si için $R/R_{av} = 2$ oluncaya kadar çok benzer davranış sergilemektedirler. Daha yüksek R/R_{av} değerlerinde benzerlik kaybolmaktadır. Gaz fazı için ise atomlar arası bağlar kopuk durumdadır ve atomlar arası mesafe rastgele dağılım göstermektedir. Şekil 2.3'te net olarak görüldüğü üzere amorf malzemelerde uzun mesafede düzensizlik olsa da kısa mesafede bir miktar düzen mevcuttur. Tüm amorf malzemeyi kısa mesafede düzenli bölgelerden oluşan düzensiz bir yapı olarak ele alırsak düzenli bölgelerden düzensize geçişlerde bağların bir kısmı kopmaktadır. Bu tür bir yapı Zachariasen tarafından 1932 yılında "sürekli rastgele ağ" (continuous random network (CRN)) olarak adlandırılmıştır. Değişik bağlanma koordinasyonlarına sahip atomların oluşturduğu CRN için Şekil 2.1'e bakınız. Kristal Si'deki periyodik düzene sahip örgü ile a-Si:H'deki CRN bu iki malzeme arasındaki en temel farktır.



Şekil 2.3. Kristal katı, amorf katı ve gaz fazları için en yakın komşu atomun ortalama konumuna göre boyutlandırılmış ($R = R_{av}$) çift dağılım fonksiyonları [11].

Kristal Si örgüsü periyodiktir, fakat kovalent bağlarda araya giren, boşluk ve yer değiştirme gibi kusurlar ihtiva edebilir (Şekil 2.1). Bazen, bir örgü atomu olması gerektiği örgü noktasında olmayabilir; boşluk kusuru. Bazen de, bir atom örgü atomları arasında bir noktada sıkışmış gibi durabilir; araya giren kusur. Gerçek bir kristalde karşılaşılabilen diğer bir kusur türü olan yer değiştirme kusuru kristal örgüsündeki periyodikliği bozmaktadır. Elektronik özellikleri de etkileyen bu kusur boşluk ve araya giren kusur türlerinden daha karmaşıktır. Eğer araya giren kusur aynı zamanda bir boşluk kusuru da oluşturuyorsa, bu tür kusurlara Frenkel kusuru denir.

2.2. KİMYASAL BAĞLAR

a-Si:H yarıiletken malzemesi CRN ile tanımlanmış kovalent bağlı bir yapıya sahiptir. Tek bir silisyum atomunda 2 adet 3s ve 2 adet 3p olmak üzere 4 adet değerlilik elektronu vardır. Silisyum atomları amorf yapıyı oluşturma üzere bir araya geldiklerinde kimyasal bağlanma gerçekleşir: her bir silisyum orbitali $\frac{1}{4}$ s ve $\frac{3}{4}$ p yörüngesini içeren en düşük enerji seviyesine ulaşır. Hibritleşme denilen bu süreç

sonunda 4 adet silisyum hibrit orbitali aralarında 109.5° derece açı olacak biçimde 3 boyutlu uzayda katı fazı oluştururlar.

Bir elementin ideal durumda oluşturması beklenen bağ sayısı ‘N/8-N’ kuralı ile belirlenir; burada N valens elektronların sayısıdır. Z bağ sayısı olmak üzere N/8-N kuralı şu şekilde tanımlanabilir:

$$N \leq 4 \text{ için } Z = N \text{ ve } N \geq 4 \text{ için } Z = 8 - N \quad (2.1)$$

N/8-N kuralı bağ sayısı ile ilgili bir fikir veren bir tahmindir. Kristal Si, N/8-N kuralı ile bağdaşmayacak şekilde dışarıdan eklenen herhangi yabancı bir atomu kendi örgü düzenine uydurmaya çalışır. CRN ile tanımlanmış amorf yapısı ise misafir atomları kendi bağ yapılarıyla kabul etme eğilimindedir. Bir başka deyişle, uzun mesafede düzene sahip olan kristal Si N/8-N kuralına uymaz, ancak, kısa mesafede düzene ve uzun mesafe düzensizliğe haiz olan a-Si:H N/8-N kuralını takip eder.

N/8-N kuralını mükemmel derecede takip eden malzemeler kusur oluşturması için gerekli enerjinin düşük olduğu yüksek kusur seviyesine sahip amorf malzemelerdir. Bir yarıiletkenin elektronik uygulamalarda kullanılabilir olması için hem n-tipi hem de p-tipi katkılanabiliyor olması gerekir. Yüksek kusur seviyesine sahip bir amorf yarıiletken olan a-Si (hidrojenlenmemiş), katkılama mekanizmasının gerektirdiği N/8-N kuralının bozulmasını başaramaz. Kusur oluşturmanın kısmen kolay olduğu bu “gergin” ortamda katkılama amacıyla eklenen atomlar (n-tipi için fosfor, p-tipi için bor), kristal Si’de olduğu gibi kristal örgünün bağ yapısına ayak uydurup 4 bağ yapmak yerine, kendi ideal bağ konfigürasyonlarını oluştururlar. Sonuç olarak, yapıda fazladan elektron ya da hol oluşturma eylemi katkılama etkisini gösterecek kadar gerçekleşemez; bu eylem bir miktar gerçekleşse dahi yüksek kusur yoğunluğu tarafından gölgelenir. a-Si’de katkılamanın başarılmasının altında yatan etken hidrojenlemedir. a-Si:H’de hidrojenin yapıdaki kusur yoğunluğunu düşürücü rolüyle bant aralığının orta bölgesinde a-Si’ye göre kusur yoğunluğu (#/(eV.cm³)) cinsinden yaklaşık 10⁴ kat azaltılabilmektedir. Böylece, katkılama atomlarından N/8-N kuralını ihlal eden çok küçük bir kısmı yapıda serbest taşıyıcı oluşturabilmektedir. Kusur yoğunluğu kısmen düşük olan a-Si:H katkılama işleminin ardından elektriksel

iletkenliğinde (katkılama işleminin kalitesine göre) 10^4 - 10^6 kat iyileşme elde edilebilmektedir.

2.3. ENERJİ BANT YAPISI VE OPTOELEKTRONİK UYGULAMALAR İÇİN UYGUNLUK

Hem yarıiletkenler hem de yalıtkanlar valens bandı ile iletim bandını birbirinden ayıran yasak enerji aralığına sahiptirler. Yarı-serbest elektron teorisine göre enerji bantlarının oluşması periyodik kristal örgüsünün bir sonucudur. Enerji bant hesaplarında kullanılan temel modellerden biri olan sıkı bağlanma (tight binding) yaklaşıma göre [12], bantlaşmanın oluşumunda en yakın komşu atomlarının etkisi sonraki komşu atomlarının etkilerine göre oldukça baskındır. Bu bağlamda, kısa mesafede düzenli bir yapı sergileyen a-Si:H'nin enerji bantlarının kristal Si'ninkilere benzer bir davranış göstermesi beklenebilir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak, herhangi bir malzemenin amorf ve kristal fazlarının benzer elektronik davranışlara sahip olması beklenir. Örneğin, hem a-Si:H hem de kristal Si yarıiletken malzemelerdir. Yine Si temelli başka bir örnek verirsek, hem amorf SiO₂ (pencere camı, adi cam, mikroskop camı, vb.) hem de kristal SiO₂ (kuvars) yalıtkan ve görünür ışığa karşı saydam malzemelerdir. İlk bakışta yüksek kusur yoğunluğuna sahip a-SiO₂'nin saydam bir malzeme olması beklenmez; bunun yerine kusur durumları ile dolu olan enerji seviyelerinin ışığı soğurucu merkezler gibi davranması ve bu malzemenin opak olması beklenir. Ancak, bahsedilen sıkı bağlanma yaklaşımı elektronik davranışların belirlenmesinde en yakın komşu atomlarını hesaba katmanın (bir dereceye kadar) yeterli olacağını gösterdiğinden a-SiO₂'nin tıpkı kristal SiO₂ gibi saydam olması açıklanabilmektedir.

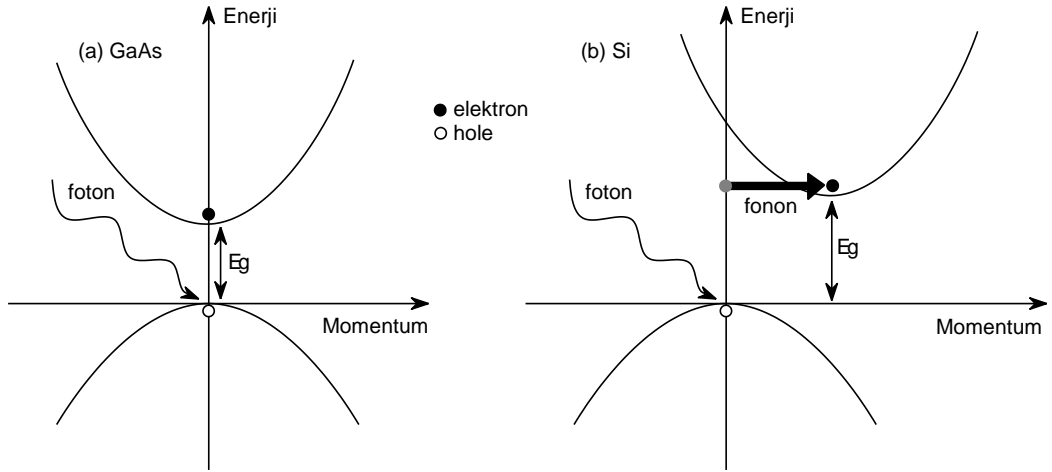
Enerji bant yapılarındaki benzerliklere karşın, a-Si:H'nin bant özellikleri kristal Si'ninki gibi Enerji – Dalga Numarası (E-k) grafiği ile gösterilmez ($p \propto k$ olduğundan dalga numarası bazen momentum olarak da adlandırılabilir); Şekil 2.2'deki Durum Yoğunluğu – Enerji grafiği kullanılır. Bunun nedeni amorf malzemelerde elektron momentumunun tanımlanamıyor olmasıdır. Amorf yarıiletkenlerin, kristal eşdeğerleriyle kıyaslandıklarında, göstermiş oldukları ilginç

optoelektronik özelliklerin anlaşılabilmesi için bu durumun bir miktar irdelenmesi gerekmektedir.

Yarıiletken malzemeler enerji bant yapılarına göre direkt ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılabilirler.

2.3.1. Direkt Aralıklı Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler

Yapıdaki elektron ve hollerin enerji-momentum düzlemindeki davranışlarını ele aldığımızda, direkt aralıklı yarıiletkenlerde (örneğin GaAs) iletim bandının minimum enerji değeri (E_c) ile valens bandının maksimum enerji değerinin (E_v) aynı momentum değerinde yer aldıkları görülmektedir (Şekil 2.4-a).



Şekil 2.4. a) Direkt aralıklı ve b) dolaylı aralıklı yarıiletkenlerde Enerji-Momentum eğrileri. Direkt aralıklı yarıiletkenlerde elektron-hol çiftinin optik uyarma ile oluşturulması için foton enerjisi yeterli iken, dolaylı yarıiletkenlerde elektron-hol çifti oluşumu için optik uyarmanın yanı sıra fonon momentumuna da gereksinim duyulur.

Enerji bant aralığı E_g olan direkt aralıklı bir yarıiletkende $E_{foton} \geq E_g$ koşulu ile optik uyarma gerçekleştirilirse E_v seviyesindeki bir elektron E_c seviyesine geçiş yapabilir. Bu geçiş sırasında elektron momentumunun aynı kaldığı varsayılır. Bu varsayımda foton tarafından elektrona sağlanan momentum ($P_{foton} = \frac{E_{foton}}{c}$) çok küçük olduğundan, elektron momentumundaki ($P_{elektron}$) değişim ihmal edilebilmektedir.

Yalnızca $E_{foton} \geq E_g$ koşulunu optik uyarma ile elektron-hol çifti oluşturmada yeterli olması, direkt aralıklı yarıiletkenleri optoelektronik uygulamalar için uygun kılmaktadır. Bu sebeptir ki direkt aralık (özellikle III-V grubu, II-VI grubu alaşımları) yarıiletkenlere fotonik kristaller de denilmektedir.

2.3.2. Dolaylı Aralıklı Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler

Si gibi dolaylı aralıklı yarıiletkenlerin enerji-bant yapısına bakıldığında (Şekil 2.4-b), E_v enerjisindeki bir elektron ile E_c enerjisindeki bir elektronun aynı momentuma sahip olmadıkları görülmektedir. Doğada gerçekleşen tüm fiziksel süreçlerde olduğu gibi, optoelektronik geçişlerde de enerji ve momentum korunum prensiplerine uyulmalıdır. Optik bir uyarma sırasında $E_{foton} \geq E_g$ koşulu enerji korunumu prensibini sağlamaktadır. Ancak P_{foton} çok düşük olduğundan $P_{elektron}$ üzerinde önemli bir değişiklik yaratmamaktadır. Bu sebeple, dolaylı aralıklı bir yarıiletkende optoelektronik geçişlerin gerçekleşebilmesi için, direkt aralıklı yarıiletkenlerdekilere farklı olmak üzere, yalnızca foton tarafından uyarılma yeterli değildir. Dolaylı geçişlerde momentum korunum prensibinin de sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan momentum, kristal yapıdaki örgü titreşimleri kuantumu olan 'fonon'lardan sağlanır. Böylece foton (E_{foton} ile) ve fonon (P_{fonon} ile) birlikte elektrona optoelektronik geçiş yaptırabilmektedirler. Ancak elektrona etki etmesi beklenen uygun enerjideki foton ile uygun momentumdaki fononun anda bulunması çok olası değildir. Bu nedenle, dolaylı aralıklı yarıiletkenlerdeki optoelektronik geçişler, direkt aralıklı yarıiletkenlerdekilere göre, daha yavaştır ve verimi düşüktür. Modern elektronik teknolojisinin temelini oluşturan Si dolaylı aralıklı bir yarıiletken olduğundan optoelektronik uygulamalarda (özellikle performansın ön plana çıktığı uygulamalarda) tercih edilmemektedir.

2.3.3. Amorf Yarıiletkenlerde Optoelektronik Geçişler

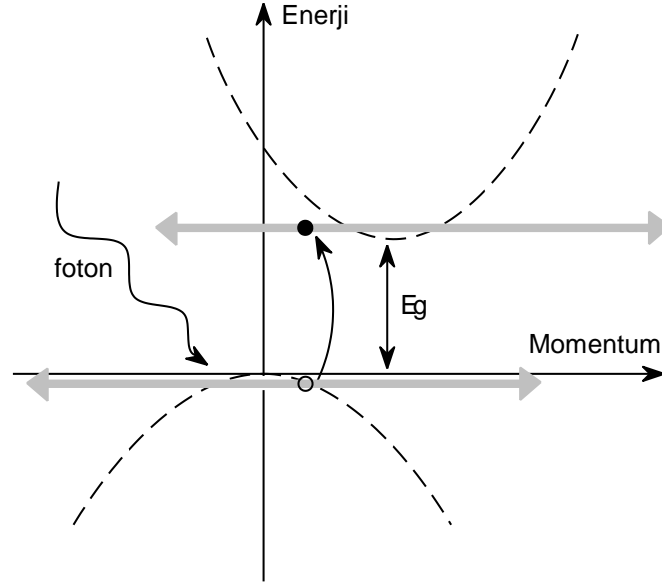
Kristal örgüsünü oluşturan atomlar periyodik olarak belirli aralıklarla uzayı doldururlar. Eğer kristal atomlarının herhangi birinin üzerinde oturuyorken, bir öteleme operasyonu ile başka bir atomun üzerine gelerseniz, göreceğiniz manzara sizin için tamamen aynı olur. Bu özelliğe kristalin öteleme simetrisi denir.

Elektronlar da kristal örgüsü içerisinde hareket ederlerken benzer bir durumla karşılaşır. Kendilerine periyodik olarak uygulanan bir Coulomb potansiyeli hissederler; belirli bir enerjide net bir momentuma sahip olurlar; konum bilgisini yitirirler. Kuantum mekaniksel yaklaşımda elektronun dalga fonksiyonu uzamıştır. Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi'ni hatırlarsak;

$$\Delta x \Delta P \sim h \quad (2.2)$$

Burada x konum, P momentum, h ise Planck sabitidir. Konum ve momentumdaki belirsizliklerin çarpımının sıfır olamayacağını ortaya koyan bu ilkedeki de anlaşıldığı üzere, belirli bir enerji ile kristal örgüsünde hareket halindeki bir elektronun konum bilgisi yitirilmişse ($\Delta x \rightarrow \infty$), momentum bilgisi kesinleşmektedir ($\Delta P \rightarrow 0$). Böylece, $E - P$ ya da $E - k$ davranışı kristal bir yarıiletken için anlamlıdır.

Amorf yarıiletkende ise bant aralığında enerji seviyeleri belirli bir dağılım göstermektedir (Şekil 2.2). Elektron, amorf yapı içerisindeki hareketi sırasında sıklıkla bant aralığındaki bant kuyuklarında ve kusur durumlarında tuzaklanıp banda geri bırakılmaktadır. Bir başka deyişle elektronun amorf malzeme içerisindeki iletimi daha çok tuzaklar üzerinden gerçekleşmektedir. Bant aralığı içerisinde yer alan tuzak seviyeleri genellikle bant kenarı referans alınacak biçimde kuantum kuyuları ile tanımlanır. Tuzaklanmış olan elektron uzayda belirli bir bölgeye hapsolmuş demektir. Yine Heisenberg Belirsizlik İlkesi'ne göre konum bilgisi kesinleşen elektronun ($\Delta x \rightarrow 0$) momentum bilgisi kaybolur ($\Delta P \rightarrow \infty$) (Şekil 2.5). Kuantum mekaniksel yaklaşımda elektronun dalga fonksiyonu yerleşmiş, momentumu ise uzamıştır. Sonuç olarak, amorf malzemelerin elektronik bant yapıları hakkında bilgi verileceğinde kristallerdeki $E-k$ grafiğinin yerine Durum Yoğunluğu – Enerji grafiği kullanılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.5. Amorf yarıiletken için enerji-bant yapısının gösterimi. Momentumdaki belirsizlik çok yüksek olduğundan optoelektronik geçişlerin momentum korunum yasasından bağımsızlığı. Amorf yarıiletkenlerin enerji-bant yapısı gösterilirken genellikle Şekil 2.2'deki yapı gösterilse de, momentum korunum yasalarının gevşemesinin gösterildiği mevcut şeklin kullanımı da oldukça faydalıdır.

Bu olgunun yol açtığı diğer sonuçlar ise şu şekilde sıralanabilir:

1. Elektronun bant kuyruğu üzerindeki hareketi sırasında gerçekleşen saçılmalar neticesinde mobilite düşer.
2. a-Si:H'nin momentumu uzamıştır. Kristal Si'de optik geçişlerin olması için momentum korunumu ilkesi gözetilirken, a-Si:H'daki elektronun momentumundaki belirsizlikten dolayı optik geçişlerde momentum korunumu aranmaz. Kristal Si dolaylı enerji aralığına sahip olduğundan optik geçişe tabi olacak elektronun uygun momentumu örgü titreşimlerinden (fonon) sağlaması gerekir. Süreci oldukça yavaşlatan bu gereklilik kristal Si'yi optik uygulamalar bakımından kullanışsız bir malzeme olmasına sebebiyet verir. Optik geçişlerin yaklaşık 1000 kat daha verimli gerçekleştiği a-Si:H optik uygulamalar için daha uygundur.

2.4. YERELLEŞME, İLETİM VE MOBİLİTE KENARI

Amorf yarıiletkenin bant aralığındaki yerleşmiş durumlar bant içerisindeki uzamış durumlardan mobilite kenarı ile ayrılır (Şekil 2.6). 0 K'de mobilite kenarından daha düşük enerjiye sahip elektronlar elektriksel ilettime katılmazlar. Mobilite kenarının bant kenarından olan uzaklığı yapıdaki düzensizliğin derecesine göre 0.1 eV ile 0.5 eV arasında değişiklik gösterir. Artan düzensizlik saçılmayı artırır, bu da mobilitayı düşürür. Taşıyıcıların mobilitesi şu şekilde ifade edilir:

$$\mu = e\tau/m = eL/mv \quad (2.3)$$

burada μ mobilite, τ saçılma zamanı, L ortalama serbest yol, v taşıyıcı ısı hızıdır.

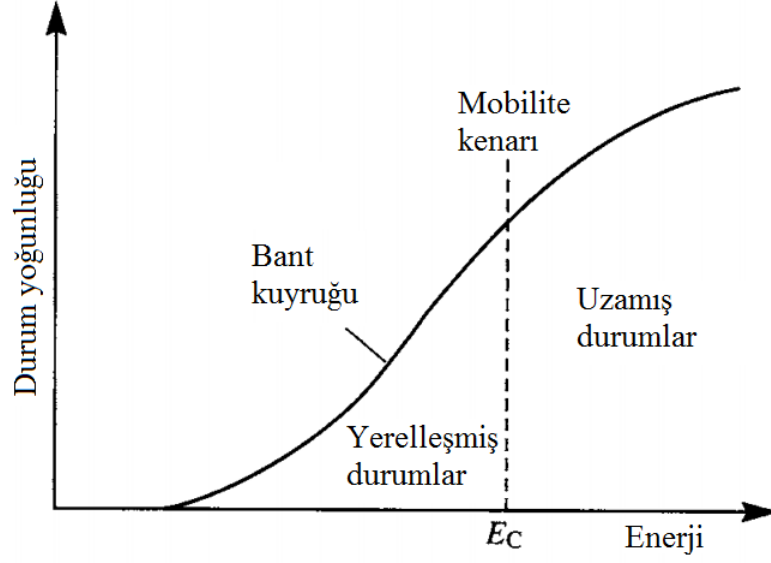
Mobilite elektronun malzemeye uygulanan elektrik alan etkisi altındaki hareket yeteneğini tanımlayan bir büyüklüktür. Karşılaştırma yapmak gerekirse, kristal Si'nin oda sıcaklığındaki elektron mobilitesi $1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ civarındadır ki bu 1000 \AA 'luk ortalama serbest yola (ya da saçılma uzaklığı) denktir. Bu değerler a-Si:H'nin oda sıcaklığındaki elektron mobilitesi ve ortalama serbest yolundan yaklaşık olarak 1000 kat daha büyüktür.

Mutlak sıfır sıcaklığında yerleşmiş durumlarda elektriksel iletim gerçekleşmez; ancak taşıyıcılar yeterli enerjiye sahipler ise kuantum kuyuları ile betimlenen yerleşmiş durumlar arasında kuantum mekaniksel tünelleme olayı gerçekleşebilir (Şekil 2.7). Tünelleme olasılığı:

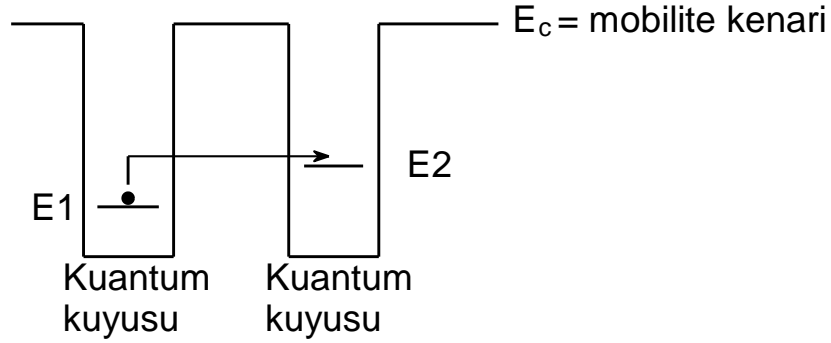
$$P_{12} = \omega_0 \exp(-2R/R_0) \exp(-E_{12}/kT) \quad (2.4)$$

$$P_{21} = \omega_0 \exp(-2R/R_0) \quad (2.5)$$

burada P tünelleme olasılığı, E_{12} iki seviye arasındaki enerji farkı, ω_0 fonon frekansı, R iki seviye arasındaki uzaklık, R_0 yerleşme uzunluğu, k Boltzman sabiti (*italik harf k dalga numarası ile karıştırılmamalıdır*), T mutlak sıcaklıktır. Pratik bir hesap



Şekil 2.6. Amorf yarıiletkenin bant kenarı yakınında mobilite kenarı ile ayrılmış olan yerelleşmiş ve uzanmış durumların görüldüğü Durum Yoğunluğu [11].



Şekil 2.7. İki kuantum kuyusu ile betimlenen iki yerelleşmiş durum arasında gerçekleşen kuantum tünelleme olayı.

ile iki enerji seviyesi arasındaki mesafe $10R_0$ 'dan daha büyük ise tünelleme olasılığı neredeyse sıfırdır; ($e^{-20} \approx 0$). Yerelleşme uzunluğu yerelleşmiş durumda tuzaklanan elektronun bağlanma enerjisi ile aşağıdaki gibi ilişkilidir [11]:

$$R_0(E) = \left(\frac{\hbar^2}{m(E-E_C)} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

burada E_C mobilite kenarıdır. Görüldüğü üzere, yerelleşme derin kuyularda daha şiddetlidir. Örneğin, yerelleşmiş durumdaki elektronun bağlanma enerjisi 0.5 eV ise

yerelleşme uzunluğu yaklaşık 3 Å'dur. Bu ifadede ayrıca, mobilite kenarında ($E = E_C$) yerleşmiş durumlardan uzamış durumlara geçildiği ($R_0 = \infty$) de anlaşılmaktadır.

Kristal yarıiletkenlerin aksine, amorf yarıiletkenler katkılanırken Fermi seviyesi (kabaca yapıdaki serbest elektronların ortalama enerjisi olarak tanımlanabilir, E_F) E_C enerjisine ulaşamaz. Sonuç olarak, amorf yarıiletkenlerde katkılama ile metalik ilettime geçilemez. a-Si:H'de temel olarak 3 iletim mekanizmasından bahsedilebilir:

2.4.1. Yayılmış Durum İletimi

Yayılmış durum iletimi taşıyıcıların ısı aktivasyonu ile gerçekleşir. Fermi seviyesi ile mobilite kenarı arasındaki enerji farkı ($E_A = E_C - E_F$) aktivasyon enerjisi olarak alınır. a-Si:H'nin katkılama oranına göre aktivasyon enerjisi 0.1 eV ile 1 eV arasında değişebilir. Matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [11]:

$$\sigma_{uza} = \sigma_{ou} \exp[-(E_C - E_F)/kT] \quad (2.7)$$

burada σ_{ou} mobilite kenarı üzerindeki (bant içerisindeki) elektronun ortalama iletkenliğidir.

2.4.2. Bant Kuyruğu İletimi

Mutlak sıfır sıcaklığında yerleşmiş durumlardaki taşıyıcılar hareketli değildirler. Eğer yerleşmiş durumlar birbirlerinden çok uzakta değilse tünelleme geçişleri gerçekleşebilir. "Hopping (zıplama)" iletimi denilen bu mekanizma matematiksel olarak şöyle gösterilir [11]:

$$\sigma_{kuyruk} = \sigma_{ok} \exp[-(E_{ck} - E_F)/kT] \quad (2.8)$$

burada E_{ck} bant kuyruğunda tanımlanan bir iletim yolunun mobilite kenarından uzaklığıdır. Bant kuyruğundaki enerji seviyelerinin sıklığına bağlı olan σ_{ok} ise bu yol üzerinde hareket eden elektronun ortalama iletkenliğidir ($\sigma_{ok} < \sigma_{oe}$).

2.4.3. Fermi Seviyesi Civarında Hopping İletimi

E_F etrafında yeterli sıklıkta enerji seviyesi bulunuyorsa, herhangi bir ısı aktivasyonu olmadan bu seviyeler üzerinden iletim gerçekleşebilir. Bu iletim türünde tünelleme olasılığı çok düşük olduğundan iletkenlik oldukça zayıftır. Uzamış durum ve bant kuyruğu iletimlerinin aksine, ısı aktivasyonu ihmal edildiğinden iletkenlik sıcaklığa hafifçe bağlıdır. Bu sebeple çok düşük sıcaklıklarda diğer iletim mekanizmaları etkilerini yitirirken Fermi seviyesi civarındaki hopping iletimi başat olur. Amorf silisyumun hidrojenlenmesi ile kusur yoğunluğu ciddi derecede azaltıldığından bu iletim mekanizması kaliteli üretilmiş olan a-Si:H için çok etkili değildir.

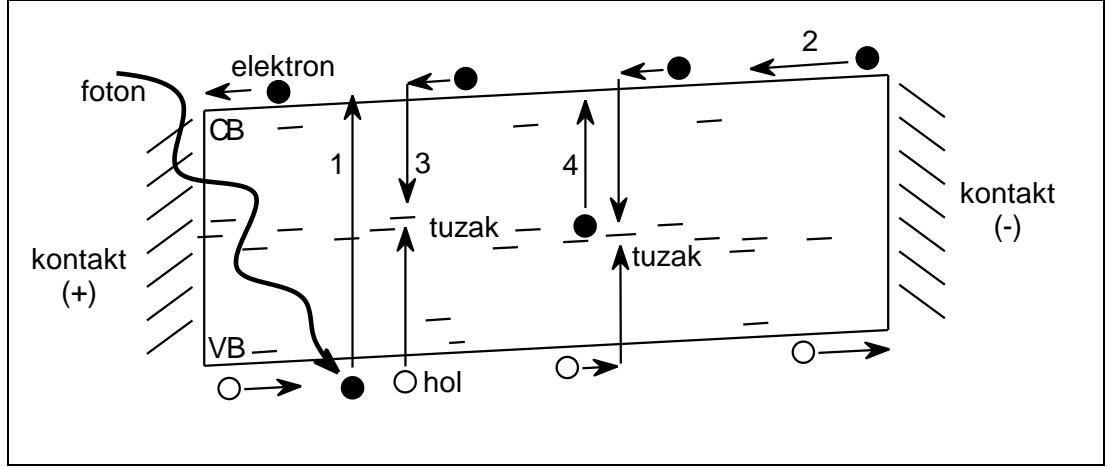
2.5. YASAK ENERJİ ARALIĞINDAKİ KUSURLARIN AYGIT PERFORMANSINA ETKİLERİ

2.5.1. Amorf Fotoiletken Malzeme

Üzerine belirli bir eşiğin üzerindeki enerjiye sahip fotonlar gönderildiğinde elektriksel iletkenliği artan malzemeye fotoiletken denir. Fotoiletkenler yarıiletken malzemelerdir ve söz konusu eşik enerji yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığıdır. Yasak enerji aralığının üzerinde bir enerjiye sahip olan foton, enerji-momentum korunum argümanları saklı kalmak kaydıyla, valens banttaki bir elektron tarafından soğrulur (Şekil 2.8, 1 no'lu ok). Soğrulan ışık enerjisi elektroni valens banttan iletim bandına taşıırken, valens bantta bir adet hol oluşturur. Bu ikiliye elektron-hol çifti denir. Böylelikle, yarıiletken malzemedeki serbest taşıyıcı sayısı ışığın soğrulmasıyla birlikte artmıştır. İletkenliğin temel formülünü düşünelim:

$$\sigma = qnv_n + qp v_p \quad (2.9)$$

Burada, σ iletkenlik, q temel yük, n serbest elektron yoğunluğu, v_n elektronların ortalama sürüklenme hızı, p serbest hol yoğunluğu, v_p hollerin ortalama sürüklenme hızıdır. Işığın soğrulmasıyla birlikte oluşan elektron-hol çiftleri uyarıldıkları bantların içlerinde hareketlidirler (Şekil 2.8, 2 no'lu ok); böylece n ve p sayılarında



Şekil 2.8. Bant aralığı içerisinde kusur seviyelerinin bulunduğu bir fotoiletkende taşıyıcı uyarılmasının, iletiminin, tuzaklanmasının ve yeniden uyarılmasının şematik gösterimi.

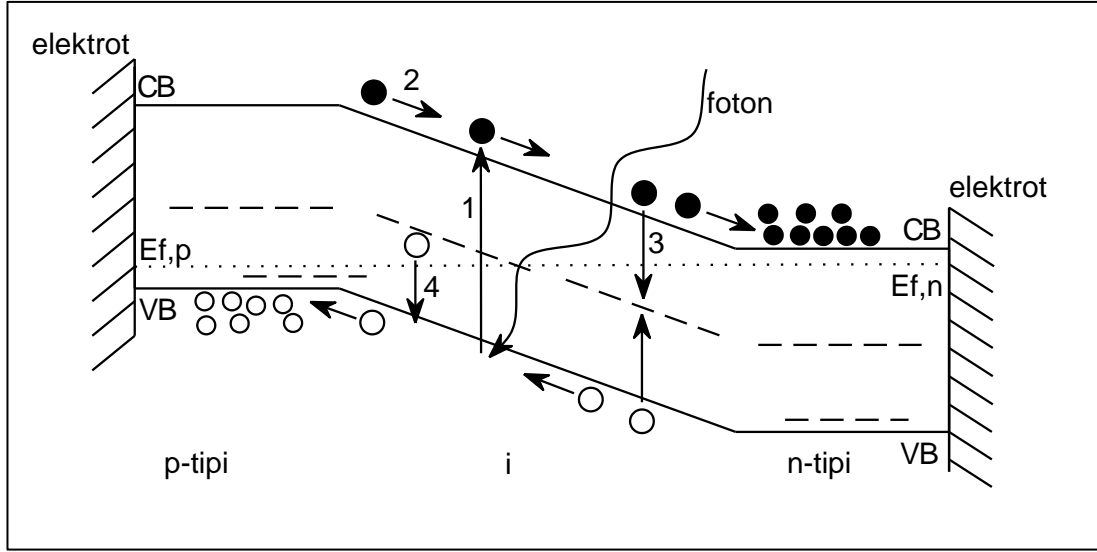
birkaç mertebelik bir artış gerçekleşir. Bu artış neticesinde iletkenlikte (σ) ciddi bir artış gözlenir. Işık yardımıyla artan bu iletkenliğe fotoiletkenlik adı verilir. Uyarılmış olan elektronlar ve holler dışarıdan uygulanan bir gerilim altında, sırasıyla, CB ve VB içlerinde hareket ederlerken bant aralığı içerisinde bulunan yerleşmiş durumlara veya derin tuzak seviyelerine reel uzayda denk gelebilirler. Böyle bir durumda, Şekil 2.8, 3 no'lu ok ile gösterilen tuzaklanma gerçekleşir ve serbest taşıyıcı sayısında kayıp meydana gelir. Serbest taşıyıcı sayısı fotoiletkenliği belirleyen başlıca faktör olduğundan, tuzaklanma olgusu fotoiletkenliği ve dolayısıyla aygıt performansını sınırlamaktadır. Tuzaklanmış olan taşıyıcılar Şekil 2.8, 4 no'lu okta gösterildiği gibi yeniden bant içlerine uyarılabilirler; ancak bu süreç de taşıyıcıların ortalama sürüklenme hızlarını azalttığından, yine fotoiletkenliği olumsuz etkilemektedir.

2.5.2. Fotodiyot

Fotoiletkenlere benzer şekilde fotodiyotlar da ışık ile uyarılan yarıiletken aygıtlardır. Fotodiyotların fotoiletkenlerden en önemli farkı harici bir gerilim beslemesi olmaksızın ışık ile uyarıldıklarında akım üretebilmeleridir. Diğer bir deyişle, fotodiyotlar ışık altında akım üretimine yol açan bir 'iç-potansiyel'e (V_{bi}) sahiptirler. Bu sebeple, fotodiyotlara 'fotovoltaik' de denilmektedir. Fotovoltaiklerdeki iç-potansiyeli yaratan olgu zıt tipte katkılanmış iki yarıiletkenin eklem oluşturmasıdır.

Yapısal olarak bakıldığında fotovoltailer p-n veya p-i-n eklem diyotlardır (burada p ve n, sırasıyla p-tipi ve n-tipi katkılanmış yarıiletkenleri, i ise katkılanmamış yarıiletkeni temsil eder). Örneğin, Şekil 2.9'da a-Si:H temelli p-i-n tipi bir eş-eklemli diyodun kararlı hal enerji bant diyagramı şematik olarak resmedilmiştir. Yapıyı oluşturan katmanlar art arda eklem halinde üretildiklerinde ve herhangi bir dış potansiyel uygulanmadığında yapıda ortak bir E_F olacak şekilde enerji bantlar bükülür. Elektron potansiyel enerjisini referans alırsak, yüksek elektron yoğunluğuna sahip olan, dolayısıyla yüksek potansiyel enerjili, n-tipi yarıiletken ile düşük potansiyel enerjili p-tipi yarıiletken arasında E_F 'ler eşitleninceye kadar elektron alış-verişi gerçekleşir (yani, yüksek potansiyelli n-tipi yarıiletken bir miktar elektronunu verir ve potansiyeli düşer; diğer taraftan, düşük potansiyelli p-tipi yarıiletken bir miktar elektron kazanır ve göreceli olarak potansiyeli yükselir; bu alış-veriş yapıda tek bir E_F seviyesi gözleninceye kadar devam eder). Sonuçta oluşan bant bükülmesi miktarı qV_{bi} kadardır. Eş-eklemli bir yarıiletken diyotta bu değer zıt katkılanmış tabakaların eklem öncesindeki E_F 'leri arasındaki fark kadardır. a-Si:H p-i-n eş-eklem diyotlar için $qV_{bi} \approx 1$ V civarındadır [11].

Fotoiletkenlere benzer şekilde, fotodiyot üzerine yasak enerji aralığının üzerindeki bir enerjiye sahip foton gönderildiğinde yarıiletkende elektron-hol çifti yaratılır (Şekil 2.9, 1 no'lu ok). Elektron-hol çiftleri gelen fotonların soğrulma noktalarına bağlı olarak bütün yapı içerisinde rastgele oluşsalar da, yüksek taşıyıcı yoğunlukları nedeniyle p ve n tipi yarıiletkenler içerisinde elektrik alan sıfır olduğundan bu tabakalarda herhangi bir bant bükülmesi gerçekleşmez; yalnızca yükten arındırılmış bölge olan i tabakasında oluşan elektron-hol çiftleri elektrik alana maruz kalarak fotoakıma katkıda bulunurlar (Şekil 2.9, 2 no'lu ok). Serbest taşıyıcı iletimi sırasında yarıiletken bant aralığındaki kusur seviyeleri C_B ve V_B içinde iç-potansiyel etkisi altında hareket etmekte olan sırasıyla elektron ve holleri bir kısmını yakalayabilirler (Şekil 2.9, 3 no'lu ok). Bu durumda fotodiyottan üretilebilecek akım kapasitesi azalmaktadır. Her ne kadar Şekil 2.9, 4 no'lu okta olduğu gibi tuzaklanmış olan taşıyıcılar tekrar bant içlerine uyarılabiliyor olsalar da, tuzaklanma sürecine dahil olmuş taşıyıcıların hem ortalama sürüklenme hızları azalmıştır, hem de tuzaklanma sırasında ürettikleri fononlar yapıda sıcaklık artışına yol açarak hem fotoakımı hem de sürüklenme hızını dolaylı olarak olumsuz etkilemektedir.



Şekil 2.9. Eş-eklemlili p-i-n diyot yapısında fotovoltatik etki ile oluşan kararlı hal elektron ve hol akımlarının şematik gösterimi; bant aralığındaki tuzak seviyelerinin oluşan fotoakıma olumsuz etkisi.

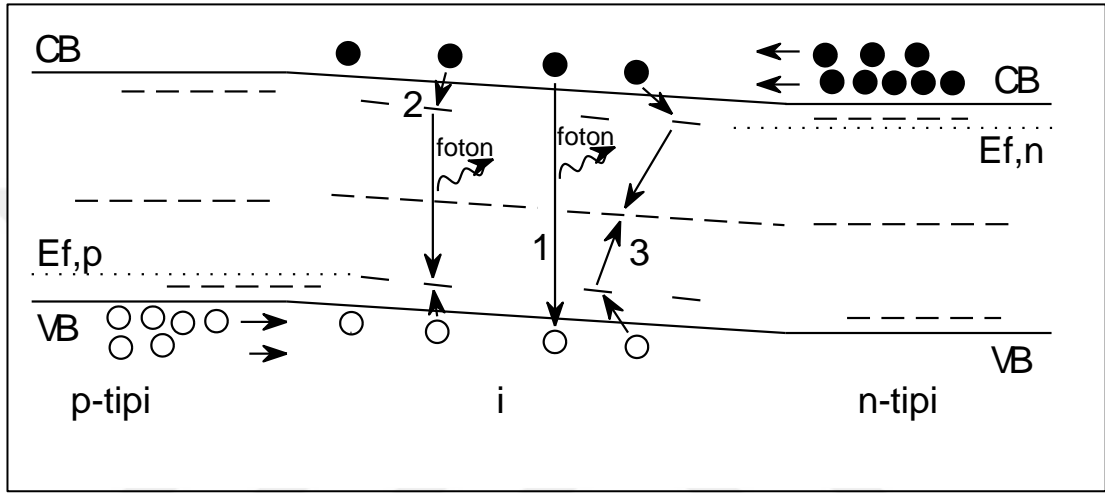
2.5.3. Işık Yayan Diyot (LED)

Yapısal olarak fotodiyotlara benzeyen LED'lerde de, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi i tabakanın iki tarafında sırasıyla p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler yer almaktadır. Fotodiyotlardan farklı olarak LED'lerdeki i tabaka kısmen ince üretilir. Oluşan p-i-n eklem diyodun denge halindeki enerji bant diyagramına bakıldığında, fotodiyodunkine çok benzer olduğu fark edilecektir. Fotodiyodun dış gerilim kaynağı olmaksızın ışık altında akım üretme özelliğinin aksine, LED, ileri besleme altında çalışmaktadır. İleri besleme sırasında, kısmen düzleşen bant bükülmesinin de yardımıyla, n-tipi yarıiletkeninden i tabakaya doğru enjekte edilen elektronlar ile p-tipi yarıiletkeninden i tabakaya doğru enjekte edilen holler i tabaka içerisinde reel uzayda denk geldiklerinde ışımali olarak birleşirler (Şekil 2.10, 1 no'lu ok). Her ışımali birleşme sırasında elektronun kaybettiği enerji dışarıya foton olarak verilir.

Özellikle amorf malzemenin i tabakasındaki yerelleşmiş ve derin enerji durumları, önceki bahsettiğimiz aygıtlarda olduğu gibi, yük taşıyıcılar için tuzak merkezleridir. Bu tuzak merkezleri ile ilgili yalnızca i tabakasından bahsedilmesinin sebebi, p ve n tabakalarda tuzak merkezlerinin olmaması değildir. Aksine, p ve n tabakalarda i tabakaya göre çok daha yoğun tuzak merkezleri vardır. Ancak aygıtın yükten

arındırılmış bölgesi, yani elektrik alanın sıfırdan farklı olduğu ve optoelektronik uygulama açısından en aktif bölgesi i tabakadır.

LED ileri beslendiğinde, i tabakadaki taşıyıcı iletimi sırasında taşıyıcılar tuzak merkezleri tarafından yakalanabilirler. Bu yakalanma Şekil 2.10, 2 no'lu ok ile gösterildiği gibi yerleşmiş sığ enerji seviyeleri tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 2.10. Eş-eklemlili bir p-i-n LED yapısının ileri besleme altındaki akım iletimini, taşıyıcı termalizasyonunu, taşıyıcı tuzaklanmasını ve ışımali-ışımalsız birleşme olgularını gösteren şematik çizim.

Bu duruma termalizasyon denir. Termalizasyon sırasında taşıyıcıların kaybettikleri enerji fononlara aktarılır. Termalizasyon belirli bir derecede gerçekleştiikten sonra taşıyıcılar için alt seviyelere yapacakları termalizasyon için gereken bekleme zamanı uzar (ps mertebesinden ms mertebesine) ve bir yerde ışımali birleşme için gereken zamana ulaşır. Bu noktada, bant kuyukları arasında elektron-hol ışımali birleşmesi gerçekleşir. Bu tür bir ışımali birleşmenin baskın olduğu ışımaya tayfında, termalizasyon ile kaybedilen enerjinin de etkisiyle, bir miktar kırmızıya kayma gözlenir. Termalizasyonun gerçekleştiği bant kuyuklarının yoğunluğuna bağlı olmak üzere ışımaya tayfında bir miktar da genişleme gözlenir. Bunlara ek olarak, taşıyıcılar iletim sırasında i tabakadaki derin tuzaklar tarafından da yakalanabilirler (Şekil 2.10, 3 no'lu ok). Derin tuzaklarda ışımalsız birleşme yapan elektron-hol çiftleri enerjilerini fononlara aktararak yok olurlar. Dolayısıyla, derin tuzak yoğunluğu fazla olan bir p-

i-n LED yapısı derin tuzak yoğunluğu az olana göre aynı akım yoğunluğu altında daha düşük bir ışımaya şiddetine sahip olur.

2.6. NEGATİF SIĞA ETKİSİ

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ve alaşımları güneş pilleri [13,14], ince film transistörler [15,16], fotodiyotlar [17], LED'ler [18-20] gibi birçok teknolojik uygulama için geniş yüzeylere çok ucuza üretimi önerdiğinden yoğun bir biçimde araştırılmaktadır. a-Si:H temelli aygıtların ilk üretimlerinin üzerinden 35 yıl geçmiş olmasına rağmen, organik fotovoltaik teknolojisi beklenen ivmeyi gösteremediğinden, a-Si:H ve alaşımları ve bu malzemeler kullanılarak üretilen optoelektronik aygıtlar halen geçerliliklerini korumaktadırlar.

Yarıiletken aygıtların kaliteleri ve performansları bileşen malzemelerin yasak enerji aralıklarındaki kusur yoğunlukları (DOS) tarafından belirlenir. DOS belirlemeye yönelik çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın kullanılanlar, uzay-yükü-limitli akım [21-24], optik soğurma [25,26] ve admitans [27] spektroskopileridir. İlk iki yöntem durgun hal taşıyıcı uyarma prensibi ile kusur yoğunluğu üzerine aşırı yükleme yaparken, admitans spektroskopisi küçük sinyal genliği ile frekans üzerinden kusurların taramasını gerçekleştirir. Diğer yöntemlerden farklı olarak, admitans spektroskopisinde taranan kusur yük taşıyıcı ile doyurulmadığından, taşıyıcı difüzyonu, termalizasyon ve bant-içi soğurma gibi kusur yoğunluğu hesabına etki eden faktörler ihmal edilebilir.

Yarıiletken tanılama yöntemleri genellikle planlanan aygıtı oluşturacak olan bileşen tabakaların ayrı ayrı üretilip, ayrı ayrı ölçümlere tabi tutulmasıyla gerçekleştirilir. Ancak yarıiletken aygıtlar çeşitli tabakaların birbiri üzerine art arda kaplanmaları ile üretilmektedir. Bu üretim sırasında her bir tabaka kendisinden önce üretilen tabakaların reaktör parametrelerinden etkilenmektedir. Bu sebeptendir ki, bileşen tabakaların ayrı ayrı tanınması sonrasında üretilen yarıiletken aygıt her zaman beklenen performansı gösterememektedir [28]. Maalesef, bir yarıiletken aygıtı bütün olarak tanımlayabilecek dinamik bir yöntem henüz geliştirilmemiştir.

a-Si:H temelli yaygın kullanılan aygıtlardan biri sırasıyla p-tipi, asal ve n-tipi yarıiletken tabakaların birbirleri ardınca üretilmesiyle elde edilen p-i-n diyottur. Bu diyot hem a-Si:H geniş yüzey güneş pili üretiminde, hem de fotodiyot ve ışık yayan diyot üretiminde kullanılmaktadır. a-Si:H p-i-n diyotları tanılamak üzere çeşitli raporlarda admitans ölçümlerine rastlanmaktadır [29-31]. Ancak bu raporlar genellikle tek bir gerilim altındaki DOS'un belirlenmesine yöneliktir [32]. a-Si:H p-i-n diyotun yasak enerji aralığındaki tüm DOS dağılımını hesaplamak üzere hazırlanmış admitans ölçümlerini içeren çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [33]. Bu durum ölçümlerin ilk bakışta fark edilebilen karmaşıklığından kaynaklanıyor olabilir.

a-Si:H p-i-n diyottan ölçülen sığa verilerinin kendine özgü bir davranışı vardır. Ters besleme altında iki metal arasına yerleştirilmiş bir dielektriğin sığası ölçülmektedir. İleri beslemede ise düşük frekanslarda negatif sığa göze çarpmaktadır. Bu rejimde frekans yükseltildikçe sığa değeri pozitif yönde artmakta ve maksimuma ulaşmaktadır. Frekans daha da arttırıldığında sığa geometrik değerine (ters beslemedeki değere) düşmektedir. Bu davranış, kabaca, yapıya enjekte edilen yük taşıyıcılarla daha önce enjekte edilmiş ve iletimi bir şekilde gecikmiş olan yük taşıyıcıların birleşmesi ile açıklanabilmektedir [31]. Yeni enjekte taşıyıcılar yapıdaki gecikmiş taşıyıcılarla birleştiklerinde uyarıcı sinyal ile 2π 'lik bir faz farkı oluşursa ölçüm sistemi bu durumu negatif sığa olarak algılamaktadır. Dolayısıyla a-Si:H p-i-n diyottan ölçülen sığa-frekans verilerindeki sığanın maksimuma ulaştığı, (yani negatif sığaya dönmeye başladığı değere) frekans, sinyale yanıt verebilen DOS'un yasak enerji aralığındaki derinliği hakkında bilgi vermektedir. Maksimum sığa değeri de bu derinlikteki DOS'un tutabildiği yük yoğunluğuna karşılık geldiğinden, DOS değeri enerji derinliğine göre hesaplanabilmektedir [33].

BÖLÜM 3

DENEYSEL SÜREÇLER

3.1. ALTTABAN TEMİZLİĞİ VE ELEKTROT KAPLAMA

Her üretim öncesinde, üzerine üretim yapılacak olan yüzey uygun koşullarda kimyasal olarak temizlenmiştir. Öncelikle a-Si:H p-i-n diyodun alt elektrotunu oluşturacak olan Cr mikroskop camı üzerine elektron-ışınli (e-beam) buharlaştırma sistemi (Univex 450) ile biriktirilmiştir. Cr kaplama öncesinde mikroskop camları sırasıyla deterjanlı su, trikloretilen ve 1:1 Saf Su : Hidrojen Peroksit çözeltileri içerisinde 3'er dakika kaynatılmıştır. Her bir süreç sonrasında beher içerisindeki örnekler 3'er dakika ultrasonik banyoda titreşime tâbi tutulmuşlardır. Temizlik işleminin ardından ıslak yüzeyler azot tabancası ile kurutulup vakit kaybetmeden üretim sisteminin içerisine yerleştirilmiş ve üretim sistemi hemen vakuma alınmaya başlanmıştır. Vakum odasının mikrobar mertebesinde basınca düşmesinin ardından Cr kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

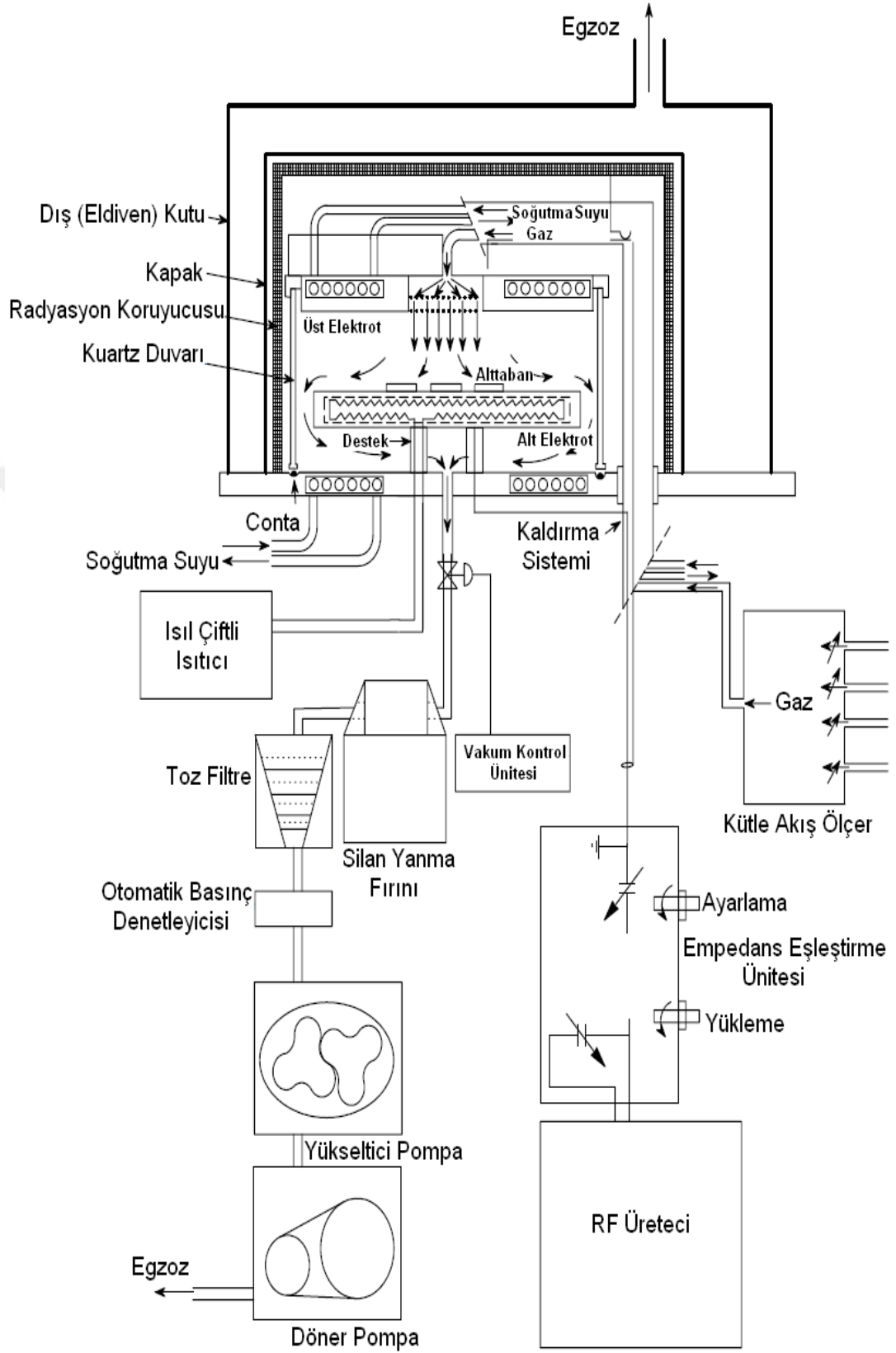
3.2. HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUM P-İ-N DİYOT ÜRETİMİ

3.2.1. PECVD Sistemi

Geniş alan elektroniğini oluşturan devre elemanlarının üretimi çeşitli üretim yöntemleri ile denenmektedir. Bunlara örnek olarak PECVD, saçtırma, Sol-Gel verilebilir. Üretilen malzemenin elektronik açıdan kalitesi ve üretimin tekrarlanabilirliği göz önüne alındığında PECVD sistemi silisyum bazlı geniş alan elektroniği teknolojisinde edindiği sağlam konumu hak etmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan silisyum bazlı diyotlar da eldeki bir PECVD sistemi ile üretilmiştir (Şekil 3.1). PECVD sistemlerinin temel çalışma prensibi ortak olduğundan bu bölümde elimizdeki sistemden bahsetmek yeterli olacaktır.

Tez kapsamında araştırılan diyotların üretiminde kullanılan PECVD sistemi Oxford Plasma Technology Plasma Lab μ 80 modeli olup radyo frekansının ISM (Endüstriyel, bilimsel, tıbbi) bandında 13.56 MHz'de çalışan bir RF güç kaynağına sahiptir. Kapasitif eşlemeli reaktörde vakum odası içerisine yerleştirilmiş birbirine paralel 10'' çapında iki adet alüminyum elektrot bulunmaktadır. Topraklanmış olan alt elektrotun altında pompaya giden gaz boşaltım hattı, basınç sensörü ve ısıtma birimi mevcuttur. Üretim sırasında kullanılacak kimyasal bileşenleri içeren gazlar ise üst elektrotta yer alan düş başlığına benzeyen bölgeden vakum odasına verilmektedir. Üretim sisteminin alt elektrot sıcaklığı 350 °C'ye kadar, RF güç yoğunluğu 222 mW/cm²'ye kadar ve vakum odası basıncı 0.001 Torr ile 9.999 Torr arasında ayarlanabilmektedir. Üretim koşulları işlem kontrol ünitesine tanımlandıktan sonra basınç ve sıcaklık değerlerinin istenilen seviyeye ulaşması için bir müddet beklenir. Daha sonra belirli akış oranlarındaki gazların sisteme girişi sağlanır ve uygulanan RF gücü ile plazma oluşturulup üretim fiilen başlamış olur.

Eldeki plazma sisteminin elektrot boyutu olan 450 cm² bu sistemle üretilebilecek maksimum aygıt boyutunu da ifade etmektedir. Yaklaşık olarak 13'' lik bir monitör ile aynı yüzey alanına sahip olan mevcut reaktör elektrotunun günümüz geniş alan elektroniği teknolojisinde aygıt/cihaz üretimi için yeterince büyük olmadığı düşünülebilir. Buna karşın, mevcut PECVD sisteminin bir araştırma sistemi olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 3.1. Tezdeki diyotların üretiminde kullanılan PECVD sisteminin şematik görünümü [3].

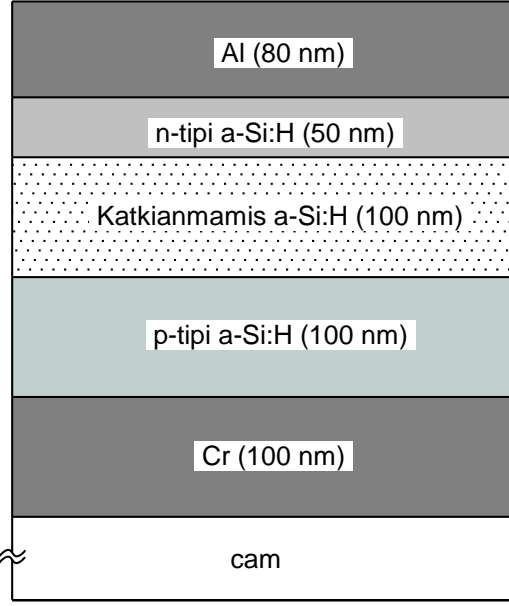
3.2.2. Amorf Yarıiletken Katmanların PECVD Sistemi ile Biriktirilmesi

Cr kaplı mikroskop camları e-beam buharlaştırma sisteminden çıkarıldıktan sonra PECVD sistemine yerleştirilmiş ve üretim sistemi vakuma alınmaya başlanmıştır. Vakum odasının basıncının 1 mTorr'a düşmesi ve reaktördeki alttaban sıcaklığının 200 °C'ye ulaşması için beklenmiştir. Sonrasında sırasıyla p-tipi, katkılanmamış ve n-tipi ince filmler Çizelge 3.1'de belirtilen parametreler ile üretilmişlerdir.

Çizelge 3.1. Tezde kullanılan a-Si:H p-i-n diyotların üretim parametreleri.

	Gazlar (sccm)				Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	Basınç (Torr)	Kalınlık (nm)
	SiH ₄	H ₂	B ₂ H ₆	PH ₃			
p	3	190	10	-	160	1	100
i	10	50	-	-	22	0.5	100
n	3	190	-	20	160	1	50

PECVD sürecinin ardından örnekler ısı buharlaştırma sistemine yerleştirilip maskeleme yöntemi ile yaklaşık 1 mm çapında Al üst elektrotlar ile kaplanmışlardır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Tez kapsamında kullanılan a-Si:H p-i-n diyodun şematik yan kesit görüntüsü.

3.3. ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

Üretilmiş olan a-Si:H p-i-n diyotlardan ileri ve geri besleme koşullarında akım-gerilim ölçümleri Keithley 595 kuvazi-statik Sığa-Gerilim sistemi ile yapılmıştır. Sığa-Gerilim-Frekans ölçümleri ise yüksek hassasiyetli Novocontrol empedans çözümleyici ile gerçekleştirilmiştir.

3.4. GERÇEKLEŞTİRİLEN DİĞER DENEYSEL FAALİYETLER

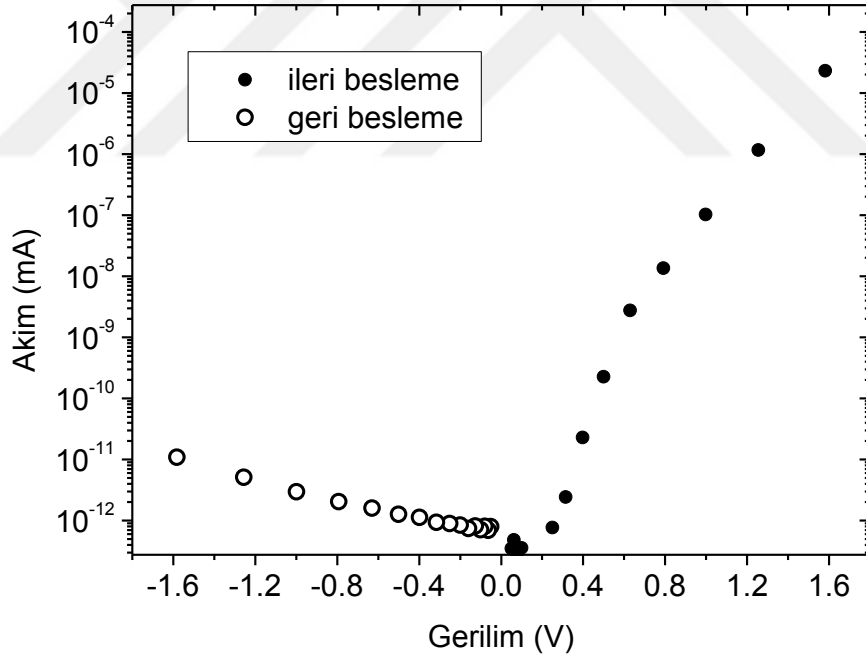
Tez kapsamında örnek hazırlanması sırasında kullanılan ve 1 MOhm dirençli su verebilen bir saf su sistemi ile PECVD sisteminin kurulumu ve çalıştırılması için gerekli olan bazı malzemeler temin edilmiştir. Sistem kurulmuş ve çalıştırılmıştır. İyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİĞİ

a-Si:H p-i-n diyotu oluşturan katmanların üretim parametreleri mevcut sistem için daha önce belirlenen optimum değerlerden seçilmiştir. Oluşan eklem diyotun kalitesi hakkında fikir sahibi olmak için ileri ve geri beslemede akım-gerilim eğrisine bakılabilir (Şekil 4.1). Diyotun gerilime göre akım davranışı şöyle özetlenebilir:



Şekil 4.1. a-Si:H p-i-n diyot Akım-Gerilim karakteristiği.

1. İleri beslemede sert tırmanış.
2. Geri beslemede düşük eğimli monoton artış.
3. 1.2 V'ta 10⁵ civarında doğrultma faktörü.

4. 0.6 V'a kadar gerçekleşen akımdaki üssel artış daha sonra seri direnç etkisiyle sınırlanmaktadır. Üssel artışın gerçekleştiği bölgede aşağıdaki ünlü diyot davranışı geçerlidir:

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (4.1)$$

burada q temel yük, V gerilim, n diyot ideallik faktörüdür. Akım, eğer yük taşıyıcıların bant içerisindeki hareketleri sonucunda oluşuyorsa $n = 1$, bant aralığının orta bölgesindeki kusur seviyeleri üzerinden elektron-hol rekombinasyonu yoluyla tamamlanıyorsa $n = 2$, bant kuyukları üzerinden iletiliyorsa iletimde aktif iletimin ya da rekombinasyonun ne kadar baskın olduğuna bağlı olarak $1 < n < 2$ olmaktadır. Bu diyot için ideallik faktörü $n = 1.5$ civarındadır. Böylece, akımın bant kuyukları üzerinden taşındığı söylenebilir.

Yukarıda belirtilen 4 davranış a-Si:H üretim kalitesinin iyi derecede olduğunu nitel olarak göstermektedir. Geri beslemedeki akımın gerilimle hafif artışından, katkılanmamış tabakadaki kusurlardan dolayı arınmış bölgenin yeterince etkin oluşturulamadığı sonucu çıkarılabilir. Ancak, mevcut diyottaki katkılanmamış tabakanın kalınlığının standart a-Si:H güneş pillerinde kullanılan tabaka kalınlığına göre yaklaşık 10 kat daha düşük olduğu hatırlanmalıdır. Dolayısıyla geri beslemede bir miktar arttığı gözlenen sızıntı akımı, diyottaki eklem özelliklerinin kötü olduğu anlamına gelmez. Benzer parametrelerle daha kalın bir katkılanmamış tabakaya sahip a-Si:H p-i-n diyotun geri besleme doyum akımının daha düşük seviyelerde kalması beklenebilir.

4.2. NEGATİF SIĞA KARAKTERİSTİĞİ

Eldeki diyotun Sığa-Frekans-Gerilim (C-f-V) karakteristiği Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında göze çarpan temel davranışlar ve olası açıklamaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Çok yüksek frekanslarda uygulanan polarlamanın türünden bağımsız olarak yaklaşık 200 pF'lik geometrik sığa değerine ulaşılmaktadır. 1 MHz ve üzeri

yüksek frekanslarda amorf malzemedeki taşıyıcıların tuzaklanma zamanları AC sinyal değişimine cevap veremeyecek kadar uzundur. Bu sebeple, çok yüksek frekanslarda sinyal metal elektrotlardan gelmektedir.

2. Geri beslemede frekanstan bağımsız olarak geometrik sığa değeri ölçülmektedir. İnce film amorf yarıiletken diyotlarda geri besleme sırasında arınmış bölge elektrotlara kadar çekilmektedir. Arada serbest yük bulundurmeyen yarıiletken bölge yalıtkanmış gibi davranır. AC sinyale yanıt verecek serbest taşıyıcılar bu durumda da yalnızca metal elektrotlarda mevcuttur.
3. İleri beslemedeki herhangi bir gerilimde frekans MHz seviyelerinden kHz seviyelerinde inerken sığa geometrik sığanın üzerine çıkmaktadır. Frekans düşürülmeye devam ettiğinde ise sığa ilginç derecede sert bir biçimde çok yüksek negatif değerlere inmektedir. Negatif sığa etkisinin açıklanmasında zorlanılan olgular bu maddede başlamaktadır. İleri beslemede frekans düşürüldükçe, yarıiletken katmanlarda akım iletimini sağlayan yük taşıyıcılar da AC sinyale yanıt vermeye başlarlar. Sinyal artık geometrik sığayı belirleyen metal elektrotların birbirlerine olan uzaklıklarına göre daha yakın mesafelerden gelmeye başlar. Basitçe, ϵ aradaki bölgenin dielektrik sabiti, A diyot yüzey alanı ve d AC sinyale yanıt veren yükler arasındaki mesafe olarak alındığında, sığa değeri

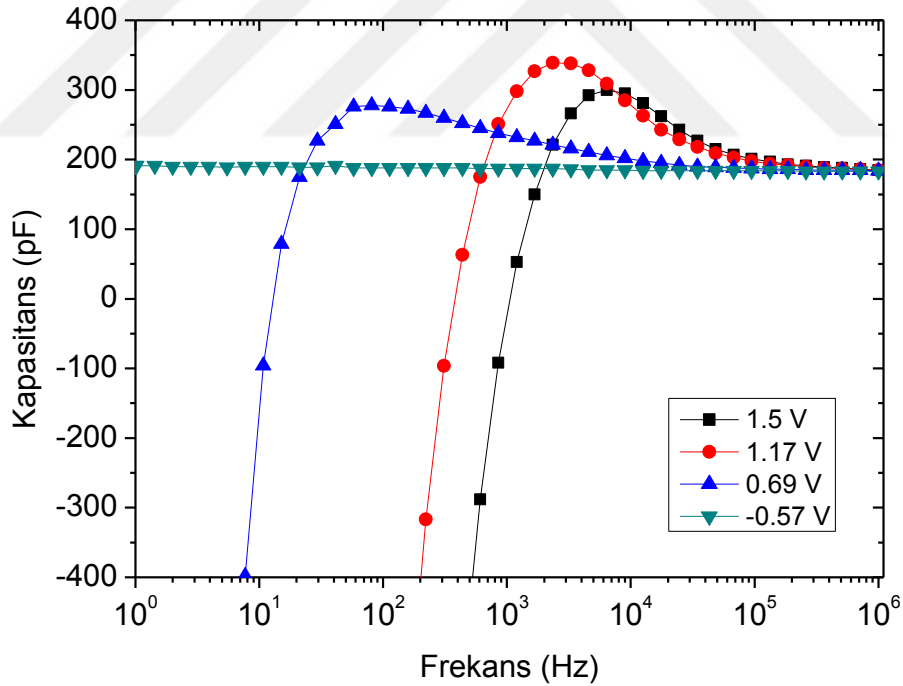
$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (4.2)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Frekans düşerken d değeri de düşer ve sığa yükselir. Frekansın düşürülmeye devam etmesiyle AC sinyale yanıt veren yük taşıyıcılar arasındaki mesafenin sıfırlanması ve sığadaki yükselişin bir yerde sonsuza gitmesi beklenebilir. Bu durum bir bakıma doğrudur. Çünkü frekans düştükçe sinyal daha derinlerden alınabilmeye başlamaktadır ve gerçekten de belirli bir frekans değerinde sinyalin geldiği noktada yük taşıyıcılar birleşmektedir. Ancak sığa sonsuz yerine negatif değerlere gitmektedir. Tam bu noktada $\infty \cdot 0$ belirsizliği oluşmaktadır. Yük taşıyıcılar arasındaki mesafenin sıfıra ulaşması sonucunda sığanın sonsuza ulaşması beklenirken, aynı zamanda, yük taşıyıcılar rekombinasyon sonucunda

birbirlerini yok edeceklerinden sığanın sıfırlanması gerekir. Aslında sinyal alışageldiğimiz sığayı oluşturan reaktif modan çıkmıştır. Yük miktarının gerilim miktarıyla doğru orantılı olduğu standart sığa kavramının aksine, burada aynı frekans değeri için gerilim arttığında yük miktarı (Q) azalabilmektedir (Şekil 4.2). Sığanın genel tanımına bakarsak;

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (4.3)$$

sığa değerinin negatif değerlere ulaşabilmesi için AC gerilim sinyalini referans aldığımızda standart sığa kavramı ile 180° 'lik bir faz farkına sahip olması gerekir. Standart sığa empedansının gerilimin 90° gerisinde olduğunu düşünürsek, negatif sığa içerisinde uygulanan AC geriliminin 90° önünde olan bir devre elemanını hesaba katmak gerekebilir; yani *bobin*.



Şekil 4.2. a-Si:H p-i-n diyotun değişik gerilimlerdeki Sığa-Frekans karakteristiği.

4. Sığanın negatif değerlere indiği frekans, uygulanan ileri besleme gerilimi ile doğru orantılıdır. Bu bilgi yük taşıyıcıların bant kuyukları üzerindeki tuzaklanma zamanları ve bu tuzakların yoğunluğu hakkında bilgi verebilir.

4.3. EŞDEĞER DEVRE DENEMESİ

Ölçülen C-f-V davranışını daha derinden anlayabilmek için gönderilen AC sinyalin diyot içerisinde nasıl işlendiğinin bilinmesi gerekir. Elektriksel olarak yapının analizine olanak sunan en temel yöntemlerden birini eşdeğer devre oluşturmaktır. Sonuçta diyota verilen bir gerilim uyarması vardır ve bu uyarmaya karşı diyotun verdiği tepki empedans çözümleyicide sığa olarak okunmaktadır. Doğal olarak, ölçülen sığa sinyali birçok değişik devre elemanının verdiği tepkiyi içerebilir.

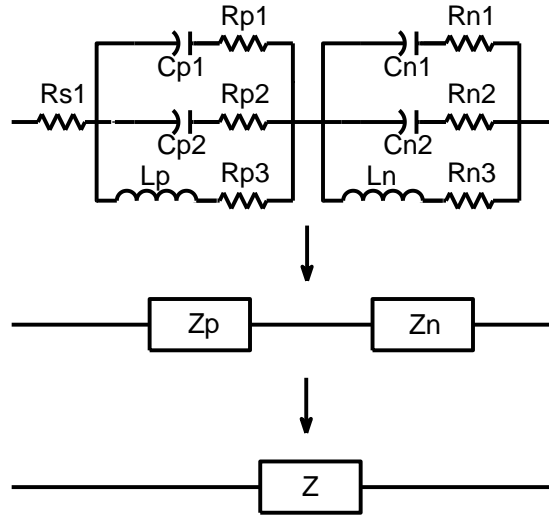
Bir sistemde negatif sığa etkisini oluşturabilecek olası etkenlerden biri Bölüm 4.2’de bahsedildiği gibi bobindir. Uygulanan gerilim artışına göre yük miktarı artıyorsa kapasitör, azalıyorsa bobin davranışı gözleniyor demektir. Ayrıca, negatif sığa etkisi akımın aktif olarak iletildiği ileri beslemede görüldüğünden a-Si:H’deki bant kuyruğunda gerçekleşen AC hopping iletimi ve buna bağlı olarak AC frekansına ω^{-s} faktörü ile bağlı olan direnç etkisi de hesaba katılmalıdır [34]. AC hopping iletim modeline göre s değerinin 0.6 ile 0.8 aralığında bir değer alması beklenmektedir.

Bu bağlamda, eşdeğer devrede birbirine paralel kapasitör, bobin ve dirençler kullanılmıştır (Şekil 4.3). Yapıda iki tür yük taşıyıcı da aynı anda bulunduğu ve bu taşıyıcılar değişik elektriksel davranışlara sahip olduklarından her bir yük taşıyıcı için ayrı ayrı devre elemanlarının tanımlanması gerekmektedir. Şekil 4.3’teki devre matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(Z_p)^{-1} = \left(\frac{1}{i\omega C_{p1}} + R_{p1} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{i\omega C_{p2}} + R_{p2} \right)^{-1} + (i\omega L_p + R_{p3})^{-1} \quad (4.4)$$

$$(Z_n)^{-1} = \left(\frac{1}{i\omega C_{n1}} + R_{n1} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{i\omega C_{n2}} + R_{n2} \right)^{-1} + (i\omega L_n + R_{n3})^{-1} \quad (4.5)$$

$$Z = Z_p + Z_n \quad (4.6)$$



Şekil 4.3. Seri direnç ile p/i ve i/n arayüzlerindeki devre elemanlarının gösterildiği MATLAB benzetim algoritmasında kullanılan eşdeğer devrenin p- ve n-tipi bölgelere karşılık gelecek şekilde iki ayrı empedans ile gösterilmesi. Empedans analizörünün ölçüm sonucu bu iki empedansın seri toplamı olarak modellenmiştir.

Burada, p ve n alt simgeleri ile p-i-n diyot yapısının p/i ve i/n arayüz bölgeleri ifade edilmektedir. ω uygulanan AC gerilim frekansı, C sığa, R direnç, L indüktans ve Z empedanstır. Hesaplama kolaylığı bakımından bu adımdan sonra empedans yerine admitans, yani $Y = \frac{1}{Z}$ kullanılabilir. Böylece matematiksel olarak modellenen sığa değeri, G iletkenlik olmak üzere,

$$Y = G + i\omega C \quad (4.7)$$

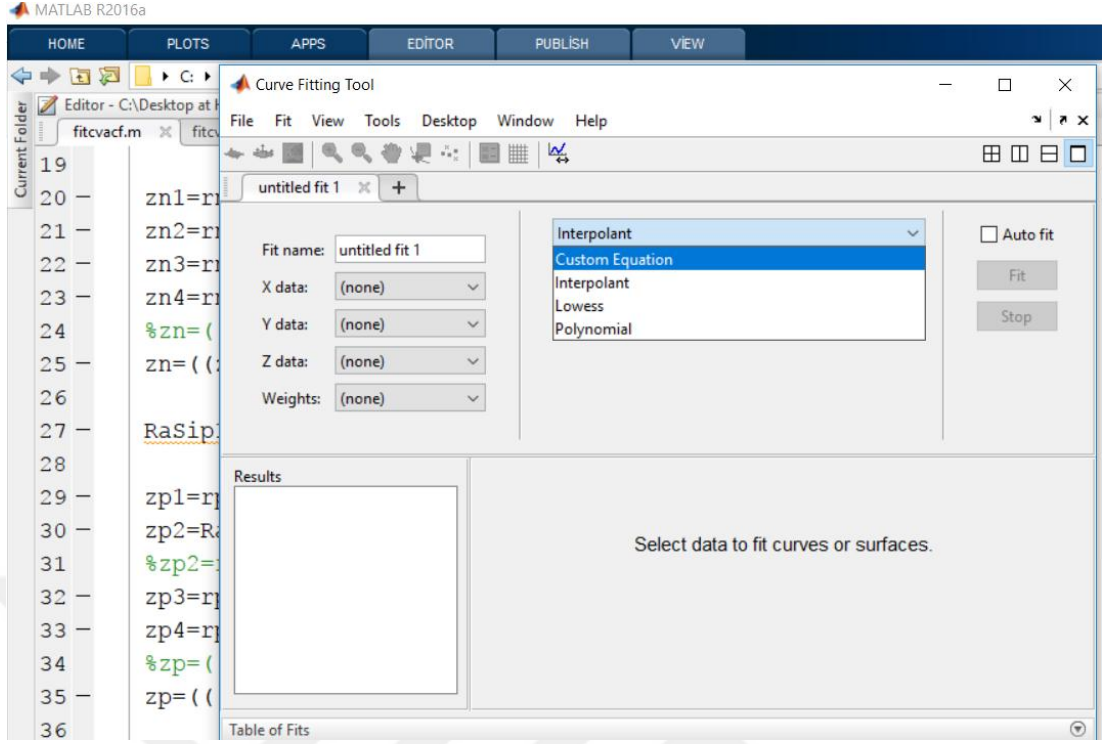
ifadesinden

$$C = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Y) \quad (4.8)$$

olarak hesaplanır. Artık, frekansın bir fonksiyonu olarak elde edilen admitans değeri kullanılarak sığanın frekansa göre davranışına ulaşılabilir. Bu ifade, Şekil 4.2'de ölçülmüş olan çeşitli gerilimlerdeki C-f davranışını modellemede kullanılabilir.

4.3.1. MATLAB Curve Fitting Tool Araç Kutusu

Deneysel verinin matematiksel olarak modellenebilmesi için çeşitli optimizasyon algoritmaları mevcuttur. Örneğin, MATLAB yazılımı içerisindeki Curve Fitting Tool (*cftool*) araç kutusu matematiksel bir fonksiyonu herhangi veri kümesine en çok benzetecek şekilde fonksiyon katsayılarını bulan bir yazılımdır (Şekil 4.4). MATLAB 2014 ve öncesi versiyonlarda komut penceresine (Command Window) “*cftool*” yazıldığında karşımıza çıkan bu eğri uydurma araç kutusuna daha sonraki MATLAB versiyonlarında APPS sekmesinden de ulaşılabilir. Araç kutusu açılmadan önce X data ve Y data olarak kullanılacak olan veri noktaları MATLAB ortamında vektörler olarak tanımlanmalıdır. Daha sonra, X data ve Y data için ilgili vektörler seçilebilir ve davranışı modellenen veri kümesi oluşturulabilir. Sonrasında, ne tür bir matematiksel davranışın öngörüldüğü “Custom Equation”, “Interpolant”, “Lowess” ve “Polynomial” seçeneklerinden biri seçilerek belirtilmelidir. Eğer veri kümesi, eğri uydurma araç kutusundaki kalıp fonksiyonlardan herhangi birine uymuyorsa veya matematiksel model kısmen karmaşık bir yapıya sahipse “Custom Equation” seçeneğinden istenilen denklem, istenilen katsayı/parametrelerle birlikte yazılabilir. Eğri uydurma araç kutusu yazılan bu denklemdeki katsayıları optimize ederek fonksiyonun veri kümesine en iyi şekilde benzemesi için uğraşmaktadır. Bu işlemler “Fit Options” sekmesinden kontrol edilebilmektedir. Benzetim işlemi iterasyon yöntemi ile yapıldığından, “Fit Options” sekmesinden ayarlanabilen fonksiyon katsayılarının ilk değerleri eğri uydurmanın başarılı olabilmesi için oldukça önemlidir. Aynı zamanda, uydurulan eğri ile veri kümesi arasındaki farka ne ölçüde göz yumulabilir, iterasyon sayısı, vb. seçenekler “Fit Options” sekmesinden ayarlanabilmektedir. Eğri uydurma işlemi sonucunda, matematiksel modelin veri kümesine ne ölçüde benzediği görsel olarak grafik ekranında görülmektedir. Eğri uydurma başarısı sayısal olarak regresyon (R) adı verilen sapma parametresi ile de anlaşılabilir. Elde edilen sonuçta R değeri 1’e ne kadar yakınsa eğri uydurma işlemi o kadar başarılı olmuş demektir.



Şekil 4.4. Herhangi bir veri kümesinin basit matematiksel denklemlerle modellenebildiği MATLAB Curve Fitting Tool arayüzü.

Curve Fitting Tool araç kutusu kısmen basit fonksiyonlar kullanıldığında pratik olarak eğri uydurma ve matematiksel modellemede oldukça başarılı olsa da, optimizasyon sürecinde kullanıcıya çok sınırlı kontrol sunmaktadır. Tüm kontrolü kullanıcının ele alabilmesi için eğri uydurma algoritmasının bir MATLAB altprogram yapısında tanımlanması gerekmektedir.

4.3.2. MATLAB Altprogram Yapısı ile Matematiksel Modelleme

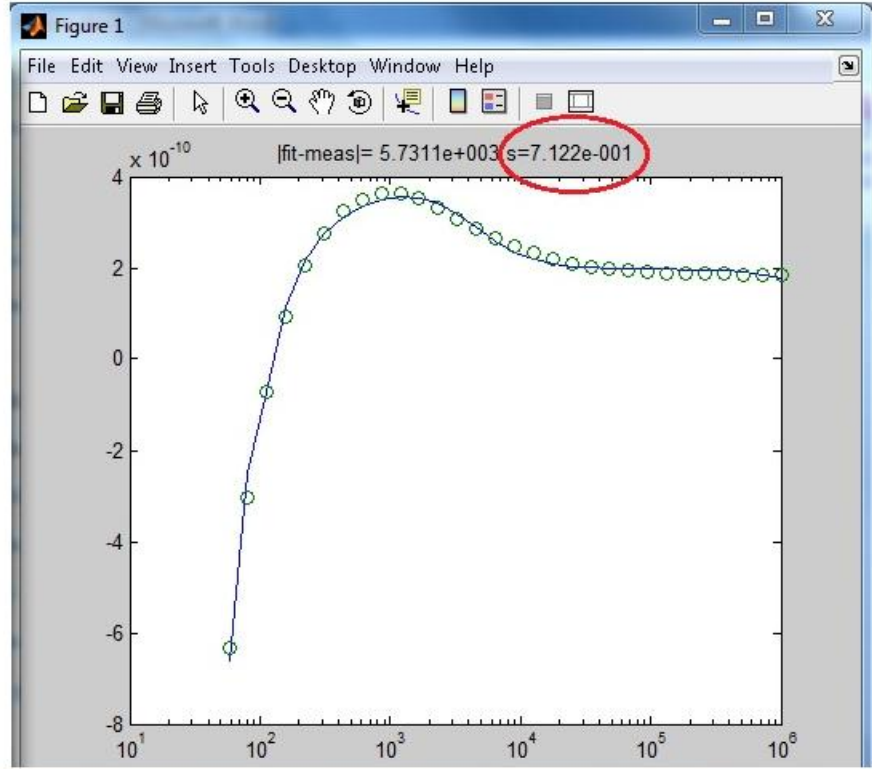
MATLAB Curve Fitting Tool araç kutusu, veri kümesi ile matematiksel model arasındaki farkı en aza indirmeye çalışan bir algoritma kullanmaktadır. Bu algoritma MATLAB komutlarından *fminsearch* ile uygulanmaktadır. *fminsearch* komutu herhangi bir fonksiyonu minimum yapan değişken değerlerinin elde edilmesine yaramaktadır. Eğri uydurma işleminde, veri noktaları ile bu veri noktalarına karşılık gelen fonksiyon değerleri arasındaki farkların kareleri toplamı yeni bir fonksiyon olarak tanımlanır ve bu yeni fonksiyonun minimum değeri bulunmaya çalışılır. Bu yöntem “en küçük kareler yöntemi (least squares method)” denir.

Curve Fitting Tool içerisinde gömülü olarak yer alan *fminsearch* komutu MATLAB editör sayfasında da kullanıcı tarafından bağımsız olarak kullanılabilir. Böylece kullanıcının yazmış olduğu kendi m-file ile matematiksel modellemedeki bütün kontrol kullanıcının eline geçmiş olur.

fminsearch komutu belirli bir başlangıç değerine sahip olan katsayılar vektörünü temel alarak iterasyon sürecini başlatır ve belirtilen parametreler çerçevesinde iterasyonu tamamlar. Araç kutusu yerine MATLAB editör sayfasında kullanıcı tarafından yazılan kodda *fminsearch* komutu ile minimum değeri aranacak olan “farkın kareleri toplamı” fonksiyonu bir MATLAB altprogramı ile tanımlanmalıdır. Bu altprogram içerisinde, matematiksel model ve bu model için tanımlanan her türlü sınırlandırmalar yer almaktadır. Örneğin, matematiksel modelin belirli bir değer aralığının dışına çıkmaması gerekiyorsa, bu durum basit bir *if* bildirimini ile altprogramda kontrol altında tutulmaktadır. Bu tür kontroller Curve Fitting Tool araç kutusunda mümkün değildir.

Bu bağlamda, öngörülen eşdeğer devrenin MATLAB’da yazılan bir benzetim programında deneysel veri ile matematiksel model arasındaki farkın en aza indirilmesi amacıyla devre elemanlarının fiziksel ilkeler çerçevesinde rastgele değerler almalarına izin verilmiştir (Şekil 4.5). Şekilde görüldüğü üzere, uygulanan eşdeğer devre modeli kullanılarak elde edilen benzetim oldukça başarılı gözükmektedir. Sonuçta elde edilen *s* değerinin yaklaşık 0.7 bulunmuş olması, öngörülen AC hopping iletim mekanizmasının bu diyot yapısı için gerçekçi bir yaklaşım olduğu kanaatini doğurmaktadır.

Aynı C-f eğrisinin veri kümesi için uygulanan matematiksel modelde eşdeğer devredeki bobin kolları iptal edildiğinde ve benzer parametreler kullanıldığında eğri uydurma süreci başarısız olmaktadır (Şekil 4.6). Düşük frekans bölgesinde ölçülen negatif sığa etkisine herhangi bir şekilde geçiş gözlenmemektedir. Sürecin sonu beklendiğinde, en iyi uydurulan eğri ancak sabit bir geometrik sığa değerini göstermektedir. Bu durum eşdeğer devre modelinde mutlaka bobinin kullanılması gerektiğine işaret etmektedir. Kapasitör ve bobin arasındaki 180°’lik faz farkı göz önüne alındığında, belli bir frekansın altında baskın olan zıt yüklerin rekombinasyon



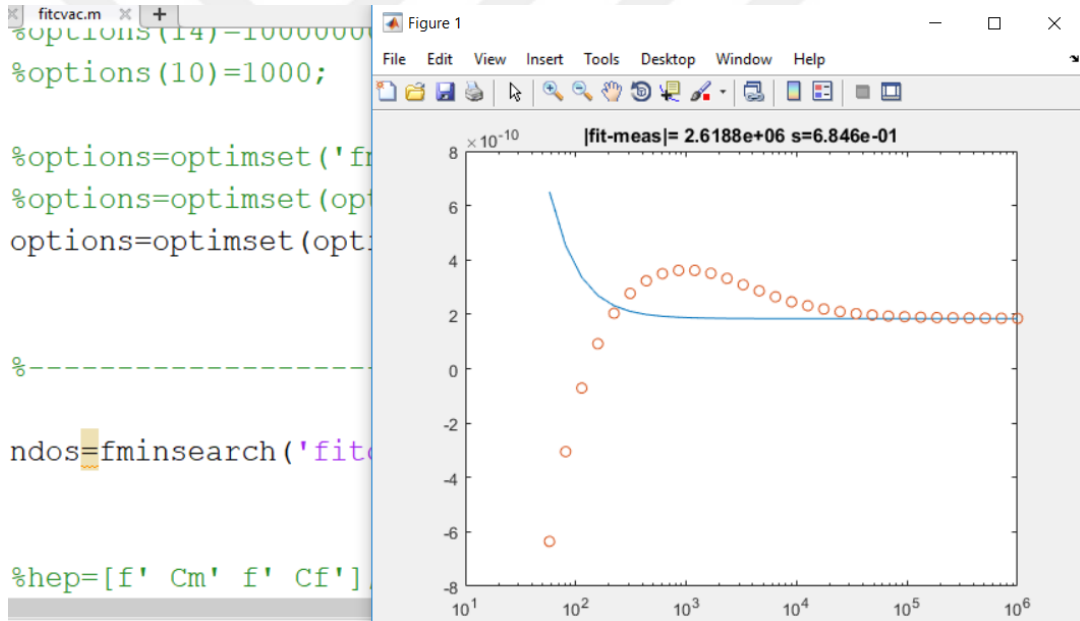
```

Editor - Editör (çift Açık) - C:\Program Files\MathWorks\MATLAB\bin\matlab.exe
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Base
1 function err=fitabsf(k,f,Cm)
2 - global Csin n
3 %----- fit parameters
4
5 - cn=abs(k(1)); ln=abs(k(2)); rn1=abs(k(3));rn2=abs(k(4)); rn3=abs(k(5))
6 - cp=abs(k(9)); lp=abs(k(10)); rp1=abs(k(11));rp2=abs(k(12)); rp3=abs(k(
7 %l=0;
8 % if r3<0;r3=10;end
9 % if c<1e-10;c=1e-10;end
10 - if s<.1;s=.2;end
11 - if t<.1;t=.2;end
12 %r1>0;r2>0;r3>0;r4>0;l>0;s<1;
13 - for I=1:n;
14
15 - w=(2*pi*f(I));
16 - RaSin1=rn1*(f(I)^(-s));RaSin2=rn2*(f(I)^(-s));RaSin3=rn3*(f(I)^(-s));%
17
fitcvac.m indutive.m fitcvacf.m
fitabsf Ln 1 Col 1 OVR

```

Şekil 4.5. Yukarıdaki şekil: içi boş yuvarlaklar belirli bir iletken besleme altında ölçülen sığa-frekans verisi, düz çizgi eşdeğer devre modelinin deneysel veriye oturtulması. Aşağıdaki şekil: MATLAB’da tanımlanan eşdeğer devre modelindeki direnç değerlerinin Hopping modeline uygun olacak biçimde frekansa bağlı seçilmesi.

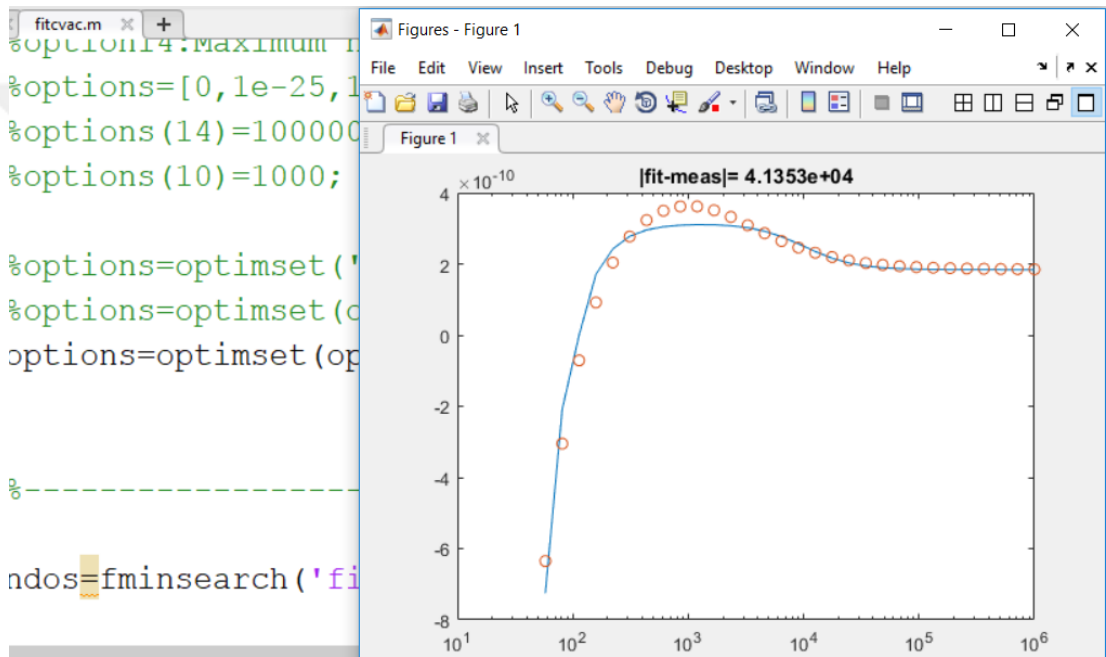
sonucu birbirlerini yok etmelerinin neden olduğu negatif sığa etkisinin benzetiminin bobin ile mümkün olduğu konusunda makul bir sonuç elde edilmektedir. Bu sonuç, özellikle rekombinasyon olgusunun baskın olduğu p-i-n ve p-n eklem diyotların verim çalışmalarında etkili olabilecektir. Örneğin, bir LED modellemesi sırasında oluşturulan eşdeğer devredeki indüktans değeri ne kadar yüksek çıkarsa, rekombinasyon o kadar baskın demektir. Buradan, rekombinasyon miktarının nitel olarak bulunabileceği ve benzer koşullarda üretilmiş olan diyotların aygıt performanslarının nitel olarak karşılaştırılabileceği anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, negatif sığa etkisinin fizik dışı, hatalı bir olgu olarak yorumlanmak yerine, rekombinasyon gibi yük miktarının azalmasına işaret eden bir olgunun sığa ölçüm sistemindeki doğal bir yansıması olarak ele almak daha doğru olacaktır.



Şekil 4.6. Eşdeğer devrede bobin kolunun devre dışı bırakıldığı durumdaki matematiksel modelin deney verilerinden farklılığı.

Farklı bir eşdeğer devre denemesinde ise yine aynı C-f veri kümesi için, bu defa AC hopping iletim mekanizmasının karakteristiği olan empedansın ω^{-s} bağımlılığı devre dışı bırakılmıştır (Şekil 4.7). Bobin kolunun devre dışı bırakıldığı Şekil 4.6'daki deneme ile kıyaslandığında kısmen daha başarılı bir eğri uydurma sonucuna ulaşılmıştır. Negatif sığa etkisi büyük ölçüde benzetilebilirken, özellikle sığanın maksimuma ulaştığı frekans aralığındaki benzetim pek başarılı görünmemektedir. Bu durumu yorumladığımızda, negatif sığanın klasik anlamdaki sığa ile zıt etkiye sahip

olan rekombinasyon sonucunda gözlemlendiği ve bobin ile benzetilebileceği anlaşılmaktadır. Sığanın maksimum değere ulaştığı frekans bölgesinde ölçülen pozitif sığa değerleri, admitans sinyalinin henüz reaktif akımdan kaynaklı olduğunu göstermekte ve gerilim uyarısına karşılık yük taşıyıcıların verdikleri yanıtın p-i-n diyotun i tabakasındaki yerleşmiş durumlardan geldiğini göstermektedir. a-Si:H malzemedeki yerleşmiş durumlarda gerçekleşen yük taşıyıcı hareketi AC hopping mekanizması ile açıklandığından, buradaki C-f verisi AC hopping mekanizması göz ardı edildiğinde başarılı bir biçimde benzetilememektedir.



Şekil 4.7. Eşdeğer devredeki devre elemanlarının frekans bağımlılıklarının iptal edilmesi durumunda elde edilen en iyi benzetim.

BÖLÜM 5

SONUÇ

Bu tezde öncelikle geniş alan elektroniği alanında teknolojiye önemli bir yere sahip olan a-Si:H hakkındaki temel bilgiler elektronik özellikleri bakış açısıyla özetlenmiştir. Bu malzemenin uygulamalarda yer alması ve araştırılmasının altında yatan en önemli etkenin modern elektronik teknolojisinin neredeyse tamamının tek bir elemente, yani Silisyum'a *bağımlılığı* olduğu vurgulanmıştır.

Silisyum hem doğada en çok bulunan elementlerden biri olması, hem tek element halinde yarıiletken özelliği göstermesi, hem de işlenmesi kolay ve olgunlaşmış bir teknoloji olması dolayısıyla diğer yarıiletken malzemelerden daha avantajlıdır. Modern mikroelektronik teknolojisinde kullanılan kristal Silisyum'un amorf versiyonu olan a-Si, 1970'lerin ortalarına kadar teknolojik uygulamalar bakımından vasat bir malzeme olsa da, hidrojenlenmenin de etkisiyle birlikte, 1976 yılında a-Si:H'nin p- ve n-tipi katkılanabildiğinin gösterilmesi üzerine a-Si:H malzemesini temel alan milyarlarca dolarlık bir optoelektronik pazarı oluşmuştur. Günümüzde cep telefonları, TV ve monitör ekranlarının arka panel sürücü devrelerinin tamamı a-Si:H TFT'lerden oluşmaktadır. Benzer şekilde, geniş yüzeyli güneş pillerinin neredeyse tamamı a-Si:H temelli p-i-n diyotlardan üretilmektedir.

a-Si:H malzemesinin elektronik kusur yoğunluğu kristal versiyonla kıyasladığımızda oldukça fazladır. Bu sebeple, ilk bakışta teknolojik uygulamalar için elverişsiz olarak kalacağı yanılgısı oluşabilir. Ancak, optoelektronik özelliklerin belirlenmesinde uzun menzilli karmaşadan çok, a-Si:H'de de gözlenmekte olan kısa menzilli düzen söz sahibidir. Böylece, kusur yoğunluğu yüksek olsa da a-Si:H'nin enerji bant özellikleri kristal silisyumu bir miktar andırmaktadır. Örneğin, ikisi de yarıiletkendir.

Kusurlu bir yapıya sahip olan a-Si:H'nin optoelektronik uygulamalarda kullanılabilmesi için iki tip katkılanabilmesi gerekmektedir. Hidrojenlenme işlemi sonrasında kusur seviyesi önemli ölçüde azaltılabilen a-Si:H'da katkılama etkisi görülebilse de aygıt performansı bakımından daha yüksek katkılama oranlarına erişmek gerekmektedir. Bu bağlamda, katkılama tabakaları olarak p-tipi ve n-tipi a-Si:H yerine nc-Si:H kullanılmıştır.

Yüksek kaliteli a-Si:H film ve aygıt üretiminde kullanılan PECVD yönteminin elimizdeki PECVD sistemi üzerinden tanıtımı yapılmıştır. Teze ayrılan zamanın önemli bir kısmını mevcut PECVD sisteminin kurulması, çalıştırılması ve iyileştirilmesi çalışmaları aldığından üretilmiş olan diyotların optik ve yapısal özellikleri bu tez kapsamına alınmamıştır. Yalnızca elektriksel iletim ve sığa davranışları irdelenmiştir.

Akım-Gerilim ölçümleriyle diyotun eklem kalitesinin iyi derecede olduğu gösterilmiştir. Diyot ideallik faktörü ~ 1.5 olan yapıda taşıyıcı iletiminin bant kuyukları üzerinden gerçekleştiği öngörülmüştür. 1.2 V 'ta 10^5 civarında ölçülen doğrultma faktörü ve 0.6 V 'a kadar devam eden akımın gerilime göre üstel davranışı diyottaki eklem arayüzleri ve tabaka kalitelerinin makul seviyelerde olduğunu, p- ve n-tipi tabakaların katkılama oranlarının iyi olduğunu göstermektedir.

Sığa-Frekans-Gerilim verilerinin davranışları genel hatlarıyla açıklanmıştır. Eşdeğer devrede bobin kullanımıyla negatif sığa etkisini veren modellemenin deneysel veriye yakın bir davranış göstermesi gerektiği kapasitör ile bobin arasındaki 180° 'lik faz farkı göz önüne alınarak ortaya konmuştur. Klasik sığa kavramından farklı olarak ileri besleme altındaki p-i-n diyotta belirli bir frekansın altında gerilimin artırılması yük taşıyıcı sayısında rekombinasyona bağlı bir azalmaya neden olduğundan negatif sığa değerleri ölçülmektedir. Bu durum eşdeğer devre modelinde bobin kullanımıyla açıklanabilmektedir. Farklı bir eşdeğer devre model denemesinde bobin kullanılmadığında sığa değerlerinin herhangi bir şekilde negatif değerlere sahip olmadığını gösterilmiştir.

Eşdeğer devre modeli ile deneysel verinin benzetimi AC hopping iletiminin hesaba katılmasıyla (Direnç $\propto \omega^{-s}$) benzetilebilmiştir. Benzetim sonucunda s değerinin yaklaşık 0.7 çıkması AC hopping iletiminin doğru bir yaklaşım olabileceği fikrini güçlendirmiştir.



KAYNAKLAR

1. Moore G. E., "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, 38 (8): 114-117 (1965).
2. İnternet: Intel, "Intel® 14 nm Technology", <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/intel-14nm-technology.html> (2017).
3. Atılgan I., "Preparation and characterization of silicon thin films", Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 111-137 (1993).
4. Chittick R. C., Alexander J. H. and Sterling H. F., "The preparation and properties of amorphous silicon", *Journal of the Electrochemical Society*, 116 (1): 77-81 (1969).
5. Chittick R. C. and Sterling H. F., "Glow discharge deposition of amorphous semiconductors: the early years", *Tetraedrally-Bonded Amorphous Semiconductors*, *Springer*, 1-10 (1985).
6. Spear W. E. and LeComber P.G., "Substitutional doping of amorphous silicon", *Solid State Communications*, 17 (9): 1193-1196 (1975).
7. Spear W. E., LeComber P.G., Kinmond S. and Brodsky M.H., "Amorphous silicon p-n junction", *Appl. Phys. Lett.*, 28: 105-107 (1976).
8. Paul D. K., Banerjee P. K., Dutta R. and Mitra S. S., "Vibrational properties of rf sputtered hydrogenated amorphous Ge-Si alloys", *Thin Film Technologies and Special Applications*, *Proc. SPIE 0346*, Arlington, 105 (1982).
9. Carlson D. E. and Wronski C., "Amorphous silicon solar cell", *Appl. Phys. Lett.*, 28 (11): 671-673 (1976).
10. Snell A. J., Mackenzie K. D., Spear W. E., LeComber P. G. and Hughes A. J. "Application of amorphous silicon field effect transistors in addressable liquid crystal display panels" *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 24 (4): 357-362 (1981).
11. Street R. A., "Hydrogenated Amorphous Silicon", *Cambridge University Press*, Cambridge, 1-94 (1991).
12. Kittel C., "Introduction to Solid State Physics 8th Edition", *John Wiley & Sons*, USA, (2005).

13. Okamoto, H., Kida H., Nonomura S. and Hamakawa Y., "Variable minority carrier transport model for amorphous silicon solar cells", *Solar cells*, 8 (4): 317-336 (1983).
14. Han D. and Wang K., "Photo-and electro-luminescence of a-Si: H and mixed-phase alloys", *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 78: 181-233 (2003).
15. He Y., Hattori R. and Kanicki J., "Improved a-Si: H TFT pixel electrode circuits for active-matrix organic light emitting displays", *IEEE Trans. Electron Devices*, 48 (7): 1322-1325 (2001).
16. Lee C. H., Striakhilev D. and Nathan A., "Stability of nc-Si: H TFTs with silicon nitride gate dielectric", *IEEE Trans. Electron Devices*, 54 (1): 45-51 (2007).
17. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Proskuryakov Y. Y., Nikiforov A. I., Pchelyakov O. P., Teys S. A. and Gutakovskii A. K., "Normal-incidence infrared photoconductivity in Si pin diode with embedded Ge self-assembled quantum dots", *Appl. Phys. Lett.*, 75 (10): 1413-1415 (1999).
18. Kruangam D., Deguchi M., Toyama T., Okamoto H. and Hamakawa Y., "Carrier injection mechanism in an a-SiC pin junction thin-film LED", *IEEE Trans. Electron Devices*, 35 (7): 957-965 (1988).
19. Paasche S. M., Toyama T., Okamoto H. and Hamakawa Y., "Amorphous-SiC thin-film pin light-emitting diode using amorphous-SiN hot-carrier tunneling injection layers", *IEEE Trans. Electron Devices*, 36 (12): 2895-2902 (1989).
20. Boonkosum W., Kruangam D. and Panyakeow S., "Amorphous visible-light thin film light-emitting diode having a-SiN: H as a luminescent layer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32 (4R): 1534-1538 (1993).
21. Nespurek S. and Sworakowski J., "A differential method of analysis of steady-state space- charge- limited current- voltage characteristics", *Phys. Stat. Sol. A*, 41: 619-627 (1977).
22. Nespurek S. and Sworakowski J., "Use of space- charge- limited current measurements to determine the properties of energetic distributions of bulk traps", *J. Appl. Phys.*, 51 (4): 2098-2102 (1980).
23. Mackenzie K. D., Le Comber P. G. and Spear W. E., "The density of states in amorphous silicon determined by space-charge-limited current measurements", *Philos. Mag. B*, 46 (4): 377-398 (1982).
24. Kocka J., Vanecek, M. and Schauer F., "a-Si: H gap states investigated by CPM and SCLC", *J. Non-Cryst. Solids*, 97: 715-722 (1987)
25. Smith Z. E., Chu V., Shepard K., Alishi S., Slobodin D., Kolodzey J., Wagner S. and Chu T. L., "Photothermal and photoconductive determination of surface and

- bulk defect densities in amorphous silicon films”, *Appl. Phys. Lett.*, 50 (21): 1521-1523 (1987).
26. Frammelsberger W., Rübél H., Lechner P., Geyer R. and Kniffler N., “Defect characterization in amorphous silicon based solar cells by subband- gap spectroscopy with constant photocurrent measurements”, *Appl. Phys. Lett.*, 58 (23): 2660-2662 (1991).
 27. Lang D. V., Cohen J. D. and Harbison J. P., “Measurement of the density of gap states in hydrogenated amorphous silicon by space charge spectroscopy”, *Phys. Rev. B*, 25 (8): 5285-5320 (1982).
 28. Gunes M., Liu H., Fortmann C. M. and Wronski C. R., 1994 IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WC PVEC), *IEEE Press NY* 512 (1994).
 29. Pfeleiderer H. and Rauscher B., “Capacitance of amorphous silicon pin solar cells”, *Phys. Stat. Sol. A*, 75: 537-545 (1983).
 30. Caputo D., Cesare G. D., Irrera F., Palma F. and Tucci M., “Characterization of intrinsic a- Si: H in p- i- n devices by capacitance measurements: Theory and experiments”, *J. Appl. Phys.*, 76 (6): 3534-3541 (1994).
 31. Lemmi F. and Johnson N. M., “Negative capacitance in forward biased hydrogenated amorphous silicon p+-in+ diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 74 (2): 251-253 (1999).
 32. Palma F. and Pastore A., “Defects genesis in a-Si: H pin solar cells”, *Phys. Scr.*, 55: 756-762 (1997).
 33. Anutgan M. and Atilgan I., “Forward bias capacitance spectroscopy for characterization of semiconductor junctions: Application to a-Si: H pin diode”, *Appl. Phys. Lett.*, 102 (15): 153504 p.1-4 (2013).
 34. Mott N. F. and Davis E. A., (Eds.), “Electronic Processes in Non-Crystalline Materials”, *Clarendon Press*, Oxford (1971).

ÖZGEÇMİŞ

Aynur Anutgan 1979 yılında Karabük'ün Safranbolu ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Zati Ağar İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimini Safranbolu Lisesi'nde, üniversite öğrenimini de Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünde tamamladı. Halen Karabük Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde Yüksek Lisans programına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Emek Mah. Kışla Cad. Azmet Sit. A3 Blok Daire:2, 78600,
Safranbolu/KARABÜK
Tel : (543) 393 38 93
E-posta : aynur.anutgan@gmail.com