

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANODİZASYON KOŞULLARININ GÖZENEKLİ SİLİSYUM ESASLI HİDROJEN
PİLİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ**

EMİNE ESRA AĞCABAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
FİZİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ÇİĞDEM ORUÇ LUŞ**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANODİZASYON KOŞULLARININ GÖZENEKLİ SİLİSYUM ESASLI HİDROJEN
PİLİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ**

Emine Esra AĞCABAY tarafından hazırlanan tez çalışması _____ tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

YRD. DOÇ. DR. ÇİĞDEM ORUÇ LUŞ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ LUŞ _____

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL _____

Yeditepe Üniversitesi

Yrd. Doç.Dr. Ercüment AKAT _____

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2011-01-01YULAP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle büyük hevesle mutlulukla başladığım yüksek lisans eğitimimde bana desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan Sayın Yrd. Doç.Dr. Çiğdem Oruç LUŞ'a,

Engin bilgilerini deneyimlerini benimlee paylaştan Prof.Dr. Işık KARABAY'a, Arş. Gr. Dr. Süreyya Aydın YÜKSEL'e,

Laboratuar ortamında heran yanımda olan zorlu ve bir okadar keyifli süreçte yan yana çalıştığım arkadaşlarım Sevinç YILDIRIM, Sevdije ÖZTÜRK ve Merve ASLI'ya,

Yıldız Teknik Üniversitesindeki Yüksek lisans hayatıma başlamama vesile olan ablam, hocam Arş.Gr..Dr. Nimet YILMAZ CANLI'ya

Benimle birlikte her zorluğa göğüs geren benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan annem Semiha AŞÇI, babam Ahmet AŞÇI ve kardeşim Enes AŞÇI'ya

İlk gördüğüm günden beri hayatımda olmasını istediğim ömrümün sonuna kadar yanında olacağıma söz verdiğim, her an her durumda bana destek olan eşim Orhan AĞCABAY'a

Herşey için TEŞEKKÜR EDERİM...

Mayıs,2013

Emine Esra AĞCABAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez.....	9
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER.....	10
2.1 Tek Kristal Silisyum	10
2.1.1 Tek Kristal Silisyumun Yapısı.....	11
2.1.2 Tek Kristal Silisyumun Fiziksel Özellikleri	12
2.1.3 Tek Kristal Silisyumun Kimyasal Özellikleri.....	13
2.1.4 Tek Kristal Silisyumun Elektriksel Özellikleri.....	13
2.1.5 Yarıiletkenlerde Difüzyon	19
2.1.6 Difüzyon Mekanizmaları	20
2.1.7 Aktivasyon Enerjisi ve Difüzyon Kuralları	22
2.1.8 Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	26
2.2 Gözenekli Silisyum	32
2.2.1 Gözenekli Silisyumun Tarihsel Gelişimi	32
2.2.2 Gözenekli Silisyumun Hazırlanması	34

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
3.1 Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi ve Karakteristiklerinin Belirlenmesi. 38	
3.1.1 Anodizasyon Süresinin (Zamanın) Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması	40
3.1.2 Işık Şiddetinin Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması	40
3.1.3 Uygulanan Akım Yoğunluğunun Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması	42
3.1.4 HF:dH ₂ O oranının Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması	42
3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin SEM Analizi.....	43
3.3 Metal(Au)/GS Shottky Eklemlerin Eldesi	43
3.4 Metal/GS Eklemlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü	45

BÖLÜM 4

BULGULAR	47
4.1 Işık Şiddetinin Etkisi.....	47
4.1.1 Işık Şiddetinin Değiştirilmesi ile Oluşan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizleri.....	47
4.1.2 Işık Şiddetinin Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	49
4.1.3 Işık şiddetinin Kısa Devre Akımına Etkisi.....	51
4.1.4 Işık Şiddetinin Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi.....	52
4.2 Akım Yoğunluğunun Etkisi.....	53
4.2.1 Akım Yoğunluğunun Değiştirilmesi ile Oluşan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi.....	53
4.2.2.1 Akım Yoğunluğunun Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	56
4.2.2.2 Akım Yoğunluğunun Kısa Devre Akımına Etkisi	57
4.2.3 Akım Yoğunluğunun Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi.....	58
4.3 HF Konsantrasyon Değişiminin Etkisi.....	59
4.3.1 HF Konsantrasyonu Değiştirilerek Oluşturulan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi	59
4.3.2 HF Konsantrasyonunun Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	61
4.3.3 HF Konsantrasyonunun Kısa Devre Akımına Etkisi.....	62
4.3.4 HF Konsantrasyonunun Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi	63
4.4 Anodizasyon Süresinin(Zamanın) Etkisi.....	64
4.4.1 Anodizasyon Süresi Değiştirilerek Oluşturulan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi	64
4.4.2.1 Anodizasyon Süresinin Açık Devre Gerilimine Etkisi.....	67
4.4.2.2 Anodizasyon Süresinin Kısa Devre Akımına Etkisi.....	68
4.4.3 Anodizasyon Süresinin Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi.....	69
SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	74

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yüğü
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donor Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Band Genişliğı
E _H	Hidrojenin İyonlaşma Enerjisi, Hall Alanının şiddeti
erf(z)	Gauss Hata Fonksiyonu
h	Planck Sabiti (6.62x10 ⁻³⁴ J.s), Yükseklik
I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
k	Dalga Vektörü
m _e [*] , m _h [*]	Elektronun ve Deliğın Etkin Kütlesi
m _i [*]	İletkenlik Bandında Elektronların Etkin Kütlesi
m _v [*]	Valans Bandında Elektronların Etkin Kütlesi
n	Kırılma İndisi, Elektronların Konsantrasyonu
p	Deliklerin Konsantrasyonu
q	Yük
R	Yansıma Katsayısı, Direnç
t	Zaman
V	Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Metal-GS-Si yapının farklı bağıl nem ortamlarındaki I-V karakteristiği,	2
Şekil 1.2	Hava ortamında Cu-GS-Si yapısının I-V karakteristikleri (1) %45 RH (2) %80 (3) saf hidrojen.....	3
Şekil 1.3	Au-GS yapısının I-V karakteristikleri (1) oda şartlarında(T=300 K, 45%RH) ve (2) NaBH ₄ içerisinde.....	4
Şekil 1.4	HF konsantrasyonu değiştirilen gözenekli silisyum örneklerin SEM görüntüleri (a) % 9.8, (b) % 12.25, (c) 19.6 %, ve (d) % 29.4 HF oranlarında...	5
Şekil 1.5	Oluşturulan tabakanın (a ve b) üst kısmının , (c ve d) alt kısmının yüzey SEM Görüntüleri.....	6
Şekil 1.6	(a) 7.0m HF 2.0M HNO ₃ çözeltisi ile oluşturulan gözenekli silisyumun SEM Analizi.....	7
Şekil 1.7	Akım Yoğunluğu değiştirilen gözenekli silisyum örneklerin SEM görüntüleri 50 mA/cm ² (A) ve akım yoğunluğu, 100 mA/cm ² (B), 200 mA/cm ² (C), 300 mA/cm ² (D), 400 mA / cm ²	8
Şekil 2.1	Silisyumun kristal yapısı.....	12
Şekil 2.2	Silisyum atomunun yapısı ve kovalent bağ yapısı.....	13
Şekil 2.3	Silisyumun band yapısı	14
Şekil 2.4	(a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletken band yapısı.....	15
Şekil 2.5	Yarıiletkenlerde Yasak Band Genişliği.....	15
Şekil 2.6	Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu.....	16
Şekil 2.7	Bir iletkende direk ve indirek band geçişleri.....	17
Şekil 2.8	Monokristal silisyumun bant yapısı.....	19
Şekil 2.9	Malzeme içerisindeki atomların hareketi.....	20
Şekil 2.10	Özdifüzyon (kendi kendine difüzyon).....	20
Şekil 2.11	Atomların difüzyon mekanizmaları: a) Çift yerdeğişme, b)Halka yerdeğişme, c) Arayer yerdeğişme, d) Boşluk yerdeğişme ve e) Çinkonun GaAs de karmaşık yerdeğişmesi.....	23
Şekil 2.12	Difüzyon için aktivasyon enerjisi.....	24
Şekil 2.13	(1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı.....	27
Şekil 2.14	Kontaktan önce metal ve n-tipi yarıiletkenle ait enerji-bant diyagramları..	28
Şekil 2.15	Kontaktan sonra oluşan metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji	

bant diyagramı.....	30
Şekil 2.16 Schottky diyodun akım-gerilim karakteristiği.....	31
Şekil 2.17 $\phi_m < \phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji-bant diyagramı a) kontakta önce, b) kontakta sonra, c) ters besleme altında, d) düz besleme altında.....	32
Şekil 2.18 Gözenekli silisyum yapının (a) üstten görünüşünün SEM fotoğrafı, (b) kesit görünüşünün SEM fotoğrafı.....	33
Şekil 2.19 (1) Gözenekli Silisyum tabakanın (2) tek kristal silisyum üzerinde şematik Gösterimi.....	35
Şekil 2.20 Gözenekli silisyumun oluşum mekanizması.....	36
Şekil 3.1 Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.2 Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	44
Şekil 3.4 Vakumda GS/Si üzerine metal kaplanması şematik gösterimi.....	45
Şekil 3.5 Y.T.Ü Fizik Bölümü Katıhal Elektroniği Laboratuvarında bulunan elektron demeti Buharlaştırma Vakum Sistemi.....	45
Şekil 3.6 Metal/GS/Si Schottky eklemi.....	46
Şekil 3.7 Örneklerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması.....	47
Şekil 3.8 Y.T.Ü Fizik Bölümü Katıhal Elektroniği Laboratuvarında bulunan akım-gerilim karakteristiği ölçüm sistemi.....	47
Şekil 4.1 2000 lüks ışık şiddeti($d=20\text{cm}$).....	48
Şekil 4.2 4000 lüks ışık şiddeti($d=15\text{cm}$).....	49
Şekil 4.3 6000 lüks ışık şiddeti($d=6\text{cm}$).....	49
Şekil 4.4 Açık Devre Gerilimi (Voc)(mV) - Işık Şiddeti (lüks) Grafiği.....	51
Şekil 4.5 Kısa Devre Akımı (Isc)- Işık Şiddeti (lüks) Grafiği.....	52
Şekil 4.6 Akım- Gerilim Eğrisi.....	53
Şekil 4.7 Akım Yoğunluğu 8 mA/cm^2	54
Şekil 4.8 Akım Yoğunluğu 20 mA/cm^2	55
Şekil 4.9 Akım Yoğunluğu 50 mA/cm^2	55
Şekil 4.10 Açık devre gerilimi- Akım yoğunluğu grafiği.....	57
Şekil 4.11 Kısa devre akımı- Akım yoğunluğu grafiği.....	59
Şekil 4.12 Akım-Gerilim karakteristiği.....	60
Şekil 4.13 HF:dH ₂ O çözeltisi karışım oranı 1:1.....	61
Şekil 4.14 HF:dH ₂ O çözeltisi karışım oranı 1:10.....	62
Şekil 4.15 HF:dH ₂ O çözeltisi karışım oranı 1:15.....	62
Şekil 4.16 Açık devre akımı- HF konsantrasyonu değişim grafiği.....	64
Şekil 4.17 Kısa devre akımı- HF konsantrasyonu değişim grafiği.....	65
Şekil 4.18 Akım-Gerilim Karakteristiği.....	66
Şekil 4.19 10 dk lık örneğin SEM analizi.....	67
Şekil 4.20 40 dk lık örnek için SEM analizi.....	68
Şekil 4.21 70 dk lık örnek.....	68
Şekil 4.22 Açık devre gerilimi- Zaman(dk) grafiği.....	70
Şekil 4.23 Kısa devre akımı-Zaman grafiği.....	71
Şekil 4.23 Akım-Gerilim Karakteristiği.....	73

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	Silisyumun fiziksel özellikleri	13
--------------	---------------------------------------	----

ANODİZASYON KOŞULLARININ GÖZENEKLİ SİLİSYUM ESASLI HİDROJEN PİLİ PARAMETRELERİNE ETKİSİ

Emine Esra AĞCABAY

Fizik Bölümü Katıhal Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Çiğdem ORUÇ LUŞ

Bu tezde boyutları nano mertebesinde mikro mertebesine kadar değişen ve verimli Metal-Gözenekli silisyum (GS) esaslı hidrojen pili yapılması hedeflenmiştir. 1960'lı yılların sonundan itibaren dünyanın her tarafında görülen hızlı nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, ısınma gibi durumlar artan bir elektrik tüketimini ve buna bağlı olarak da yakıt tüketimini beraberinde getirmiştir. Petrol fiyatlarının yükselmesi, kaynaklarının sınırlı olması ve çevre problemleri nedeniyle, petrol ve kömüre dayalı klasik yöntemlerle elektrik enerjisi üretimine alternatif olarak yenilenebilir kaynakların kullanımı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemli ölçüde yer almaktadır. Gözenekli silisyum hidrojen pili bu tür kaynakların uygulamalarına örnek olarak verilmektedir.

Gözenekli silisyum (GS), kristal yapılı, boşlukların nanometre/mikrometre boyutlu silisyum bir ağ ile çevrelenmiş ve geniş yüzey alanı ($\sim 10^3 \text{ m}^2\text{cm}^{-3}$) ile karakterize edilen, tek kristal silisyumdan elektrokimyasal anodizasyon yöntemi ile elde edilen bir malzemedir. Elektrokimyasal aşındırma (anodizasyon) ile üretilen gözenekli silisyumun (GS), aşındırma koşulları ve tek kristal silisyumun iletkenlik tipi, katkı konsantrasyonunun değiştirilmesi ile gözenek boyutlarının ayarlanabilir olması (mikrometre-nanometre) dikkat çekmektedir. Yapının gözenekliliği, Metal/Gözenekli Silisyum/Silisyum yapıların hidrojen pili olarak kullanılmasına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır.

Gözenekli silisyumun üzeri çeşitli metallerle kaplanarak Metal/GS/Si yapılar üretilir. Metal/GS/Si elektriksel açıdan incelendiğinde Schottky tipi kontak özelliği gösterir. Bu yapı, farklı konsantrasyonlu, hidrojen içeren sıvılara daldırıldıkları zaman kendiliğinden açık devre gerilimi (Voc) ve kısa devre akım yoğunluğu (Isc) oluşturmaktadır.

Metal-GS-Si yapı hidrojen içerikli bir sıvıya yerleştirildiğinde bir tür kondansatöre benzemektedir. Yapının metal kısmı H^+ iyonlarını su moleküllerinden ayrıştırarak GS kısmında birikmeye zorlamakta, bu birikme Si kısmında elektron birikmesine neden olmaktadır. Metal ve Si 'den birer kontak alınırsa bir potansiyel fark meydana gelmektedir. Bu bir açık devre gerilimidir (Voc). Açık devre geriliminin değişimi ortamdaki hidrojen miktarı ile orantılı olarak değişmektedir. Metal-Gözenekli Silisyum-Silisyum (Metal-GS-Si) yapının hidrojen pili olarak kullanımına izin vermektedir.

Yapılmış olan tezde gözenekli silisyumun hazırlanma koşulları (anodizasyon şartları) değiştirilmiştir. Değiştirilen hazırlama koşulları ışık şiddeti, gözenekli silisyum oluşturma zamanı, kullanılan HF konsantrasyonu derişimi ve kullanılan akım yoğunluğudur.

Gözenekli silisyum 15 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu, 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm tutularak ve anodizasyon süresi 5-10-25-40-55-70-90-120 dakika olacak şekilde değiştirilerek üretilmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=542mV ve Isc=34,2µA olarak belirlenmiştir.

Gözenekli silisyum 15 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu, 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, anodizasyon süresi 55 dk sabit tutularak, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 3-6-9-12-15-20-30 cm olacak şekilde değiştirilerek üretilmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=385mV ve Isc=20µA olarak belirlenmiştir.

Gözenekli silisyum 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, anodizasyon süresi 55 dk, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm sabit tutularak, akım yoğunluğu 4, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 50 mA/ cm² olarak değiştirilerek oluşturulmuştur. Oluşan GS yapıların GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=170mV ve Isc=11,46 µA olarak belirlenmiştir.

Gözenekli silisyum anodizasyon süresi 55 dk, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm, akım yoğunluğu 15 mA/cm^2 sabit tutularak HF:dH₂O çözeltisi 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 olarak değiştirilerek oluşturulmuştur. Oluşan GS yapıların GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=150mV ve Isc=1,32 µA olarak belirlenmiştir.

Değiştirilen bu şartlar sayesinde gözenek boyutları değişmiştir. Elde edilen yapılar sonucunda da pilin gücünde artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nano yapılı Gözenekli silisyum, metal-gözenekli silisyum Schottky eklemi, hidrojen pili

**EFFECT OF ANODIZATION CONDITIONS OF POROUS SILICON BASED
HYDROGEN CELL PARAMETERS**

Emine Esra AĞCABAY

Department of Physics

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Çiğdem ORUÇ LUŞ

In this thesis, ranging from the state of the micro dimensions to the order of nano-porous silicon and efficient metal (PS) aim to develop cell-based hydrogen. Since the end of 1960's around the world, the rapid population growth, urbanization, industrialization, heating, electricity consumption and related conditions such as increasing fuel consumption brought about as. Oil prices rise and environmental problems due to limited resources oil and coal to produce electrical energy as an alternative to conventional methods based on the use of renewable resources is gaining importance day by day. Hydrogen energy in renewable energy sources is substantial. Porous silicon hydrogen battery applications, such resources are provided as an example.

Porous silicon (PS), crystal structure, voids of nanometer / micrometer-sized silicon surrounded by a network and a large surface area ($\sim 10^3 \text{ m}^2\text{cm}^{-3}$) are characterized by single crystal is a material obtained by silicon electrochemical anodization method. The fabrication of porous silicon (PS) by electrochemical etching is attractive because of the possibility of tuning the pore size, simply by choosing suitable etching conditions and the doping level of the wafer. Porosity of the structure, metal / porous silicon / silicon structures has brought a new perspective on the use of hydrogen as a battery.

Metal/PS/Si Schottky-type structures fabricated by metals evaporate on PS/Si structures. Metal / PS / Si Schottky-type contact feature analysis indicates that the electrical angle. In this structure, different concentrations of hydrogen when the self-containing liquids open circuit voltage (Voc) and short-circuit current density (Isc) are.

Metal-PS-Si capacitor is similar to a type of structure placed on a liquid hydrogen content. Metal part of the structure of water molecules separating the PS of H + ions accumulate, this accumulation leads to the accumulation of electrons at the Si. Metal and Si 'is taken from a contact potential difference occurs. This is an open circuit voltage (Voc). Open-circuit voltage varies in proportion to the amount of hydrogen exchange environment. Metal-Porous Silicon-Silicon (Metal-PS-Si) structure allows the use of hydrogen as a battery.

In the thesis, porous silicon is prepared with different anodization conditions. The different anodization conditions are current density, HF solution, anodization time and intensity of light.

Porous silicon is produced by using 15 mA/cm² current density, 1:3 HF solution in dH₂O, 8 cm in distance between the light source and the Si to be kept and by changing the anodization time 5-10-25-40-55-70-90-120 minutes produced. SEM analysis of the PS samples were formed under these conditions. The open-circuit voltage and short-circuit current are measured between Au and Si contacts. Under these conditions is the ideal samples showed us open circuit voltage Voc=542mV and short-circuit current Isc = 34.2 μ A.

The other way of producing porous silicon is by using 15 mA/cm² current, 1:3 HF: dH₂O solution, using the anodization time was 55 min at a fixed distance between the light source and the Si 3-6-9-12-15-20-30 cm to be produced by changing. SEM analysis of the PS samples were formed under these conditions, GS. The open-circuit voltage and short-circuit current are measured between Au and Si contacts. Under these conditions, is the ideal samples showed Voc=385mV open circuit voltage and Isc = 20 μ A short-circuit current.

One other way of producing porous silicon is by using 1:3 HF: dH₂O solution, using the anodization time of 55 min, 8 cm in distance between the light source and Si at a fixed current density of 4, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 50 mA / cm² was created by changing. GS structures consisting of SEM samples were analyzed. The open-circuit voltage and short-circuit current are measured between Au and Si contacts. Under these conditions is the ideal sample showed us open circuit voltage Voc = 1170mV and short-circuit current Isc = 11.46 μ A.

The last way producing the porous silicon is by using anodization time of 55 min, the distance between the light source and the Si 8 cm, the current density 15mA / cm² at a fixed HF: dH₂O solution of 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 formed as amended. GS structures consisting of SEM samples were analyzed. The open-circuit voltage and short-circuit current are measured between Au and Si contacts. Under these conditions is the ideal sample showed us open circuit voltage Voc = 150mV and short-circuit current Isc = 1.32 μ A.

In these circumstances pore sizes changed and power density of Au-PS-Si hydrogen fuel cell is rised.

Key words: Nano based Porous silicon, metal-porous silicon Schottky contact, hydrogen cell

1.1 Literatür Özeti

Gözenekli silisyum (GS) ilk defa 1956 yılında Uhler tarafından tek kristal silisyumun hidroflorik asit (HF) içinde elektrokimyasal aşındırma işlemi esnasında keşfedilmiştir. Bu malzeme nanometre mertebesinde mikrometre mertebesine kadar değişen boyutlarda boşluklarla çevrelenmiş, silisyum iskeletten oluşmakta ve yüksek yüzey alanı (yaklaşık $10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ile karakterize edilmektedir [1].

Seyreltik hidroflorik asit içinde tek kristal silisyumun anot ve platin (Pt) metalinin katot olarak kullanıldığı bir sisteme uygulanan potansiyel farkından yararlanılarak elektrokimyasal aşındırma (anodizasyon) ile elde edilen gözenekli silisyumun elektriksel, optik ve morfolojik karakteristikleri, anodizasyon sürecinde asit konsantrasyonu, sıcaklık, kullanılan tek kristal silisyumun iletkenlik tipi, katkı konsantrasyonu, aydınlatma, anodizasyon zamanı ve akım yoğunluğu gibi parametreler ile değiştirmektedir. Bu parametrelerin gözenekli silisyum malzemenin yapısal ve elektriksel özelliklerine etkileri literatür tarafından araştırılmıştır [2].

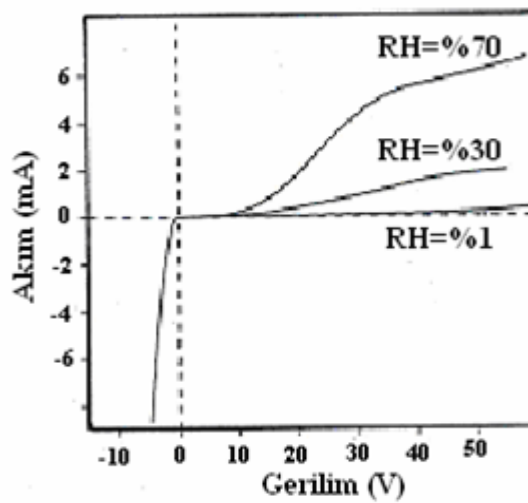
Silisyum elektronik ve yarıiletken uygulamalarda çok önemli yer teşkil etmesine karşın, indirek band yapılı olmasından dolayı optoelektronik uygulamalarda yer alamamaktadır. Gözenekli Silisyumun oda sıcaklığında görünür bölgede fotoluminesans göstermesinin Canham tarafından 1990 yılında gözlenmesi dikkati malzemeye çekmiş ve malzemeye ilgili yoğun araştırmaların başlamasına neden olmuştur. Bu açıdan bakıldığında, tek kristal silisyumdan gözenekli silisyumun elde edilmesi silisyum tabanlı bu malzemeyi optoelektronik uygulamalar için elverişli hale getirmiştir[3].

Lehmann ve Gösele (1991) gözenekli silisyum filmlerin yasak band genişliğinin tek kristal silisyumun yasak band genişliğine göre fazla olduğunu, malzemenin optik geçirgenlik deneyleri ile göstermişlerdir. Yasak band genişliğinin tek kristal silisyumunkinden fazla olması ilk olarak kuantum sınırlama modeliyle açıklanmış olup, bu modele alternatif ve ek olarak birçok model sunulmuştur [2].

Gözenekli silisyum yüzeyler silisyum hidrit ve silisyum oksitle kaplıdır. Tsai vd., (1991) gözenekli silisyum yapının ve kompozisyonunun değişim sebebinin hidrojen ve oksijen difüzyonu olduğu savını ileri sürmüştür. Gözenekli silisyumun içteki geniş yüzeye yayılması nedeniyle, yüzey bağları, özellikle, Si-H ve Si-O bağlarının gözenekli silisyumun optik, elektrik ve gaz duyarlılığı özelliklerinin ayarlanmasında önemli rol oynadıkları bilinmektedir. Gözenekli silisyumun bu özellikleri ortam nemliliğine çok duyarlıdır. Dikkate değer bu eğilim, gözenekli silisyum hakkındaki araştırmaları arttırmıştır. Bu durum özellikle Metal-GS yapıların gaz sensörleri gibi kullanılmasına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır [4].

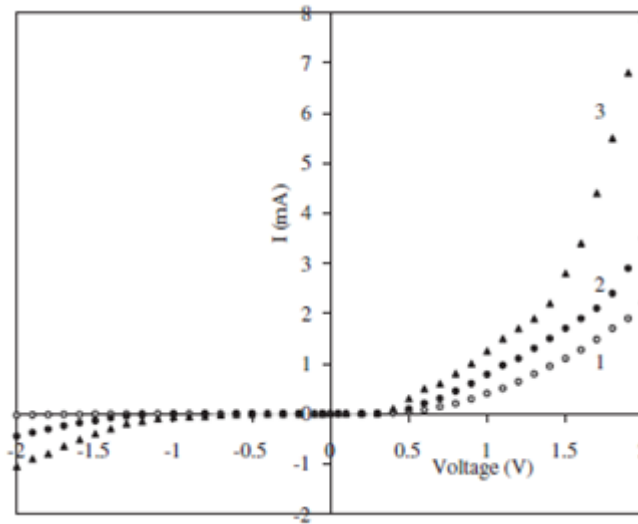
Yamana vd., (1990) Au/GS eklemlerin akımının, bir dış kaynaktan gerilim uygulandığında, bağıl neme bağlı olarak değiştiğini keşfetmişlerdir[5].

Dimitrov (1995) Metal/GS/Si yapının akım-gerilim karakteristiklerini incelemiş ve bu yapıların, Schottky tipli eklem özelliği gösterdiği, ayrıca bağıl nem değişiminde eklemlerin ters yön akım karakteristiğinin keskin değiştiği gözlemlemiştir (Şekil 1.1) [6].



Şekil 1.1 Metal-GS-Si yapının farklı bağıl nem ortamlarındaki I-V karakteristiği, (Dimitrov, 1995)

Taliercio vd., (1995) gözenekli silisyumun etkili bir oksijen sensörü olarak kullanılabileceğini önerirken, Motohashi vd., (1995) okside olmuş gözenekli silisyum yapının biyosensör olarak kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir[7]. Yukarıdaki çalışmalarda, nem ortamının metal-GS eklemlerin elektriksel karakteristiklerine etkisi, dışarıdan voltaj uygulandığı durumda incelenmiştir. Paladyum (Pd) kaplı gözenekli silisyum yapılar (Pd/GS) bir dış kaynaktan gerilim uygulanması ile hidrojenin algılanmasını sağlandığı Polishchuk vd., (1998) tarafından açıklanmıştır. Dzhaferov vb., (2001) tarafından Ag-GS eklemlerinde hidrojen içerikli sıvılarda açık devre geriliminin üretimi keşfedilmiştir. Au'nun periyodik cetvelin 1. grup elementi olmasından dolayı, Au-GS eklemlerin de hidrojen içerikli sıvılarda açık devre gerilimi üretmesi beklenmektedir. Bu çalışmanın amacı, Au-GS eklemlerinde hidrojen içeren başka farklı ortamlarda açık devre geriliminin oluşmasını ve bu olayın mekanizmasını incelemektir. Ayrıca, Au-GS eklemlerin hidrojen pili özellikleri araştırılmaktadır [8]. Dzhaferov vd., daha sonra 2002, 2004 yıllarında Metal/GS eklemlerin bağıl nem artışı ile ters yön akımının ve dış kaynaktan gerilim uygulaması gerekmeksizin açık devre geriliminin (Voc) artışı keşfetmişlerdir(Şekil1.2)[9].

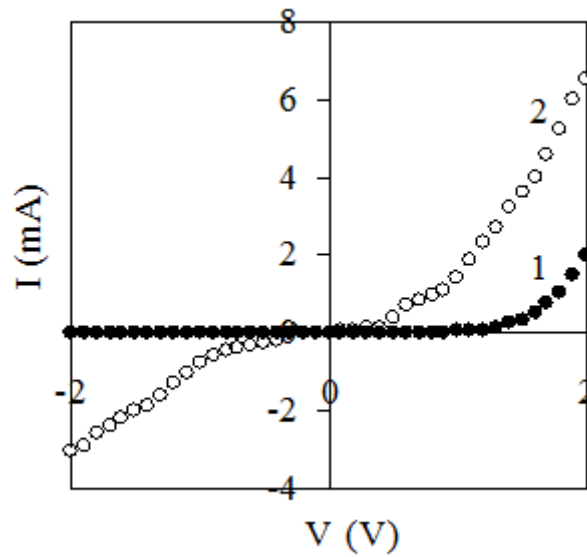


Şekil 1.2 Hava ortamında Cu-GS-Si yapısının I-V karakteristikleri (1) %45 RH (2) %80 (3) saf hidrojen (Dzhaferov,2002)

Luş, yaptığı çalışmalarda Au/GS eklemlerin farklı hidrojen içeren sıvılarda açık devre gerilimi ürettiği de göstermiştir [10,11].

Dzhafarov 2003 yılında yaptığı çalışmasında normal hava ortamında ve NaBH_4 çözeltisindeki Au-GS yapısının I-V karakteristiklerinin doğrultucu özellikler gösterdiğini Şekil 1.3 'de göstermiştir [12]. Bununla beraber, NaBH_4 ileri kutuplamadaki akım havadaki ileri akımla kıyaslandığında 3 faktörü kullanılarak artar iken, ters kutuplamadaki (Au filmi üzerinde negatif polarite) akımın değerleri havadaki ters akımla kıyaslandığında NaBH_4 çözeltisi içerisine daldırılarak (yaklaşık 115 kez, $V=-2V$) daha güçlü düzeye getirildiğini açıklamıştır. Karanlıkta, gün ışığında ve tungsten halojen lamba altındaki aydınlatmada (yaklaşık 300 mWcm^{-2}) Au-GS yapılarının I-V karakteristiklerinin ölçümünde ışığa duyarlılığının zayıf olduğunu göstermiştir [13].

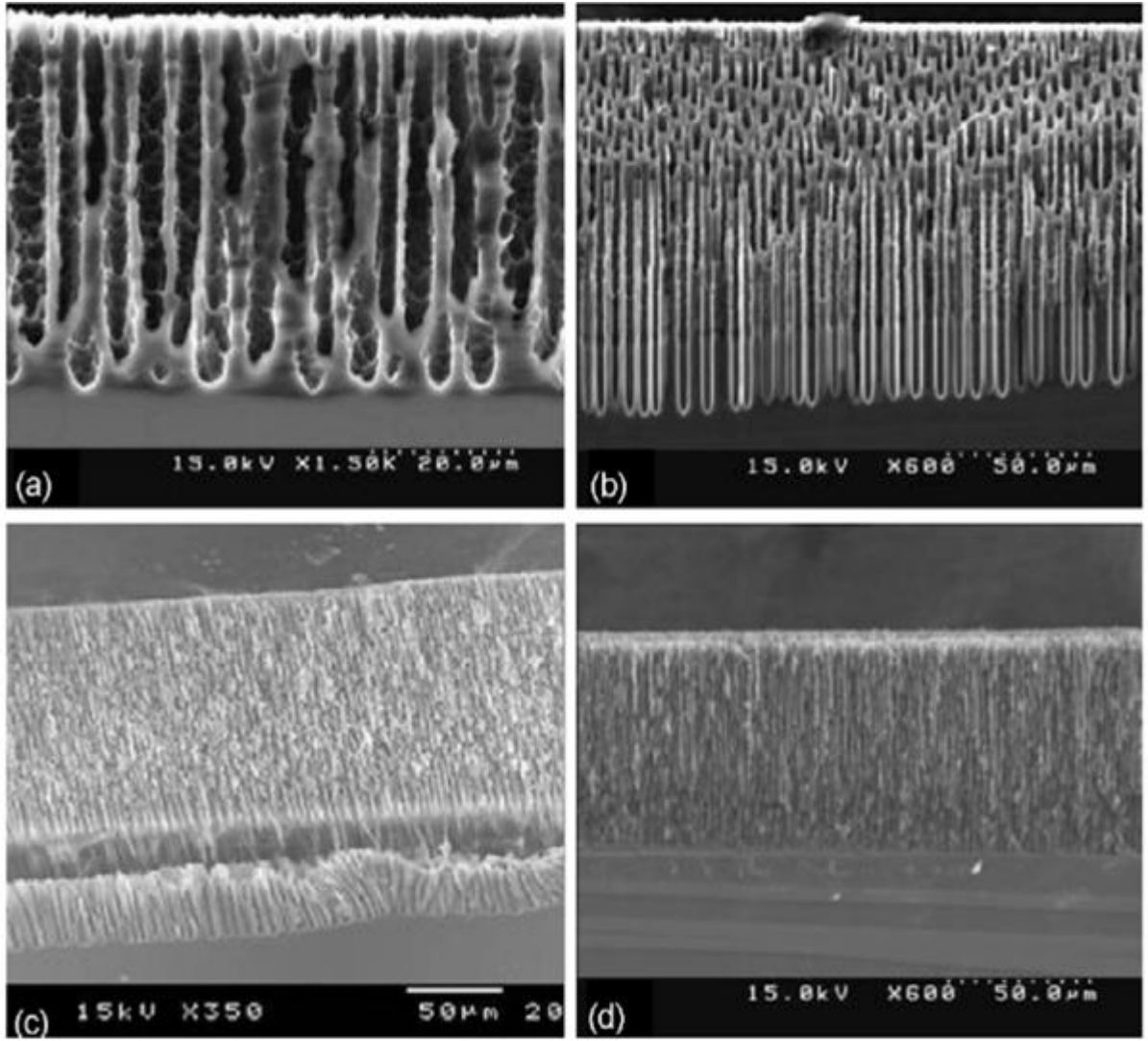
Bu etkinin, nem gerilim etkisine benzer olarak, nem oranı açılımı altında GS tabakası ve Au film kontakları arasındaki voltaj üretimini ve aynı zamanda NaBH_4 çözeltisi içine Au-GS yapısının daldırılması ile bulunduğunu açıklamıştır (Şekil 1.3) [14].



Şekil 1.3 Au-GS yapısının I-V karakteristikleri (1) oda şartlarında ($T=300 \text{ K}$, 45%RH) ve (2) NaBH_4 içerisinde (Dzhafarov,2003)

Daha sonraki yıllarda (2006) ise Yonughwan Lee ve arkadaşları hazırlanan P tipi gözenekli silisyum örneklerin hazırlama koşullarından HF konsantrasyonunu değiştirilerek çalışmalar yapmışlardır [15]. Yapılan çalışmalarda $5000\text{-}10,000 \text{ }\Omega\text{cm}$ öz dirençli 525 mm kalınlığında p tipi silisyum kullanmışlardır. Silisyum ile Pt arasındaki uzaklık 3 cm olarak belirlemişler, oluşturulan HF karışım oranını ise %9.8 den %39.2 ye

kadar değiştirmişlerdir. Elde edilen SEM grntlerinininden de anlaşılacağı gibi %29.4 lk örnekte (şekil 1.4(d)) ok az gözenek oluşmuştur [15].

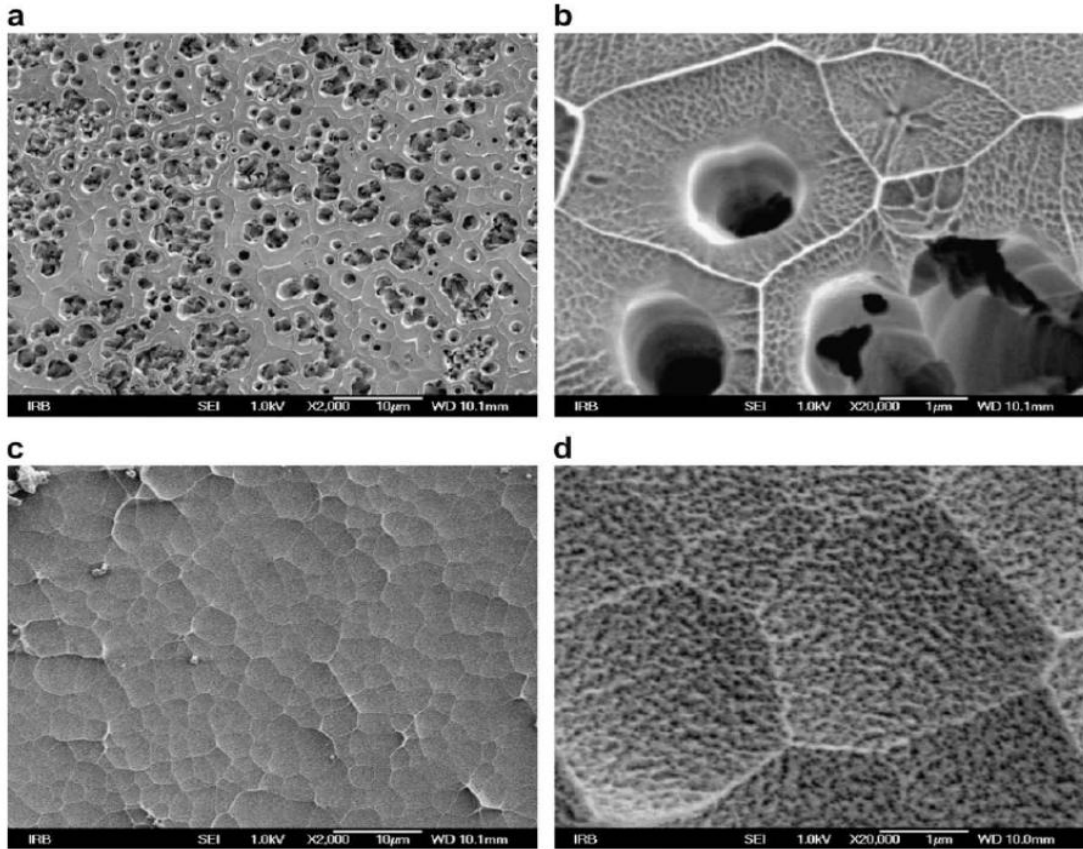


şekil 1.4 HF konsantrasyonu değiştirilen gözenekli silisyum rnekleinin SEM görüntüleri

(a) % 9.8, (b) % 12.25, (c) 19.6 %, ve (d) % 29.4 HF oranlarıda (Yonughwan Lee,2007)

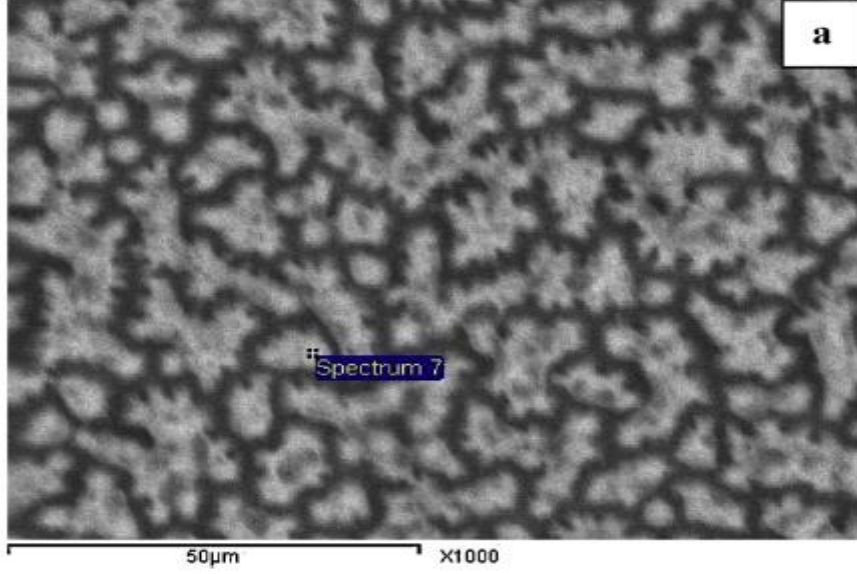
2008 yılında M.Balarin ve arkadaşları ince bir tabaka halinde hazırladıkları gözenekli silisyum tabakaların yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonlarını incelemişlerdir. P tipi gözenekli silisyum ile bir yapı oluşturmuşlar ve oluşturdukları bu yapıyı HF:etanol zltisi ile dağlayarak elektrokimyasal yöntem ile gözenekli silisyum elde etmişlerdir. Farklı boyut ve farklı derinliklere sahip gözenekli silisyum elde etmek için HF:etanol zltisini %48 oranında sabit tutarak oluşturma suresini 10-80 dk arasında değiştirmişlerdir. Sonra oluşturdukları farklı boyutlardaki gözenekli silisyum tabakaların

yapısal ve optik özelliklerini SEM ile incelemişlerdir[16]. SEM fotoğraflarına baktıklarında tabaka halindeyken çekilmiş fotoğraf (Şekil 1.5 (c)) ile tabaka ayrıldıktan sonraki fotoğraf (Şekil 1.5(a b)) arasında çok büyük fark olduğunu gözlenlemişlerdir. Tabaka ayrılmadan önce gözeneklerin az sayıda fakat derin boyutta iken tabaka ayrıldıktan sonra gözeneklerin daha yüzeysel olduğu sonucuna varmışlardır[16].



Şekil 1.5 Oluşturulan tabakanın (a ve b) üst kısmının , (c ve d) alt kısmının yüzey SEM görüntüleri (M.Balarin,2008)

2010 yılında A.S. Mogoda ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda p tipi silisyumdan HF:HNO₃ (nitrik asit) veya HF:KMnO₄ (potasyum permanganat) içerikli çözeltiler kullanarak elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile gözenekli silisyum elde etmişlerdir [17]. Daha sonra oluşan gözenekli silisyum yapıların SEM fotoğrafını çekmişlerdir (Şekil 1.6).

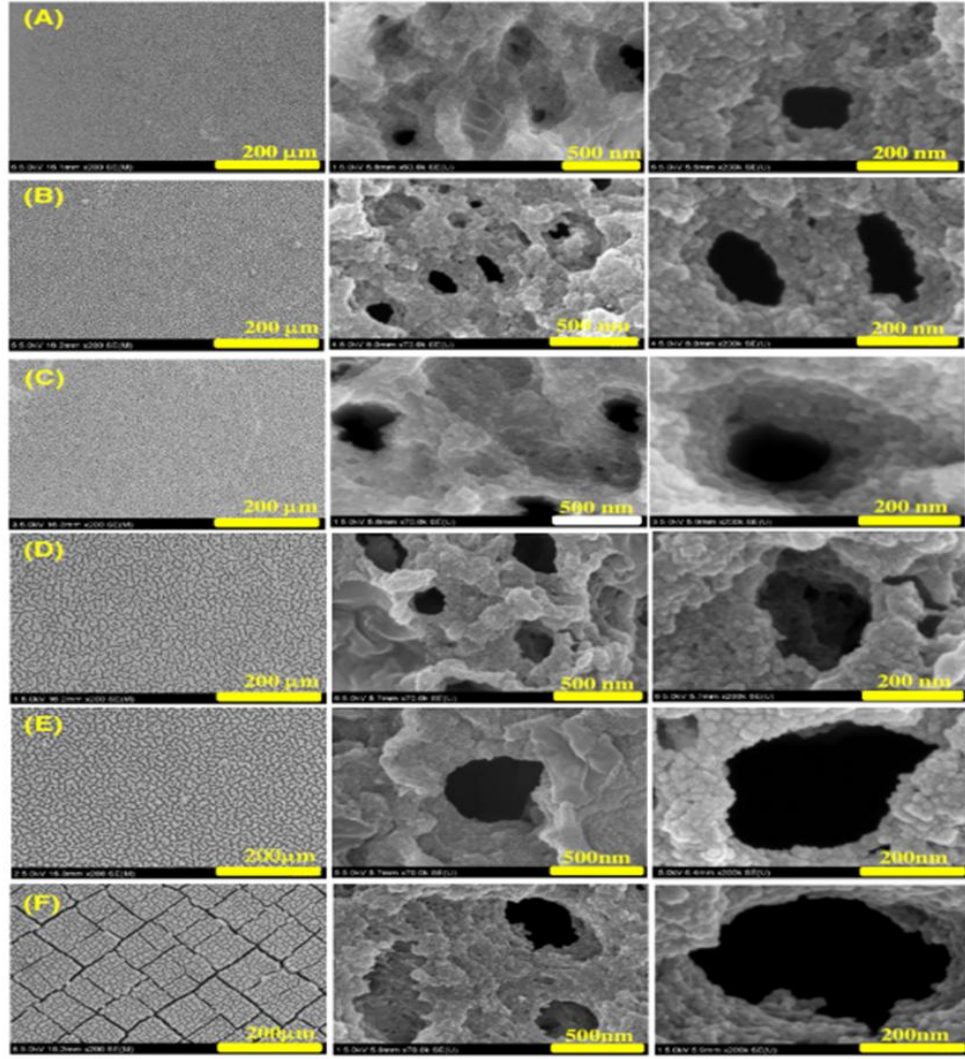


Şekil 1.6 (a) 7.0m HF 2.0M HNO₃ çözeltisi ile oluşturulan gözenekli silisyumun SEM analizi (A.S Mogoda, 2010)

Çalışmanın bu aşaması oluşturulan çözelti ile gözeneklerin ideal boyutta olduğu gözlenmiştir.

Daha sonraki yıllarda (2011) Bomin Cho ve arkadaşları yaptığı çalışmalarda ise n tipi gözenekli silisyumun yüzey morfolojilerini incelemişlerdir[18]. n tipi silisyumdan %48 oranında HF-etanol karışımı, 300W tungsten flamanlı ampul, 2420V sabit akım kaynağı kullanılarak gözenekli silisyum elde etmişlerdir. Aşındırma işlemi bittikten sonra yani gözenekli silisyum oluştuktan sonra bütün örnekleri etanol ile birkaç kez yıkamışlar ve 30 dk boyunca kuru N₂(g) altında kurutmuşlardır [18].

Yüzey morfolojilerini incelemek için gözenekli silisyumda değiştirilen parametre akım yoğunluğu olmuştur. Akım yoğunluğunu 50-100-200-300-400mA/cm² aralığında değiştirmişler ve bu değiştirdikleri şartlar altında örneklerin SEM görüntülerini incelenmişlerdir (Şekil 1.7) [18].



Şekil 1.7 Akım Yoğunluğu değiştirilen gözenekli silisyum örneklerin SEM görüntüleri 50 mA/cm² (A) ve akım yoğunluğu, 100 mA/cm² (B), 200 mA/cm² (C), 300 mA/cm²

(D), 400 mA / cm² (Bomin Cho, 2011)

Sonuç olarak yapılan çalışmalarda en ideal gözenekli örneğin 200 mA/cm² lik örnek (Şekil 1.17(B)) olduğu görülmüştür.

1.2. Tezin Amacı

Tezin amacı, anodizasyon koşulları (zaman, HF konsantrasyonu, Işık Şiddeti, Akım Yoğunluğu) değiştirilerek gözenekli silisyum üretmektir. Değiştirilen koşulların Metal-Gözenekli Silisyum Esaslı hidrojen pilinin parametrelerine etkisi incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılıp avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir.

Bu tezde n-tipi silisyum anodizasyon şartları (hazırlama koşulları) değiştirilerek gözenekli silisyum hazırlanmış daha sonra hazırlanan gözenekli silisyumun üzeri Au (Altın) metali ile kaplanarak Metal/GS/Si yapılar üretilir. Metal/GS/Si elektriksel açıdan incelendiğinde Schottky tipi kontak özelliği gösterir. Bu yapı, farklı konsantrasyonlu, hidrojen içeren sıvılara daldırıldıkları zaman kendiliğinden açık devre gerilimi (Voc) ve kısa devre akım yoğunluğu (Isc) oluşturmaktadır. Bu eklemlerin hidrojen içeren sıvılarda pil karakteristikleri incelenmiştir. Bu koşulların, hidrojen pillerinde açık devre gerilimine, kısa devre akımına etkisi araştırılmıştır. Yukarıda açıklanan yöntemlerle pilin verimi arttırılmaya çalışılmış ve Metal/Gözenekli Silisyum hidrojen pilinin kullanılabilir bir pile dönüştürülmesine çaba harcanmıştır

1.3 Hipotez

Gözenekli silisyumun üzeri çeşitli metallerle kaplanarak Metal/GS/Si yapılar üretilir. Metal/GS/Si elektriksel açıdan incelendiğinde Schottky tipi kontak özelliği gösterir. Bu yapı, farklı konsantrasyonlu, hidrojen içeren sıvılara daldırıldıkları zaman kendiliğinden açık devre gerilimi (Voc) ve kısa devre akım yoğunluğu (Isc) oluşturmaktadır. Bu özelliğinden dolayı da pil olarak da kullanılabileceği düşünülmüştür. Metal-Gözenekli Silisyum hidrojen pilinin Elektriksel parametrelerini iyileştirmek için anodizasyon koşullarının değişimi incelenmiştir. Anodizasyonda birçok parametre değiştirilebilir. Bunlardan bazıları ışık, HF konsantrasyonu, oluşması için geçerli zaman ve akım yoğunluğudur. Bu koşullar gözenek boyutlarına ve derinliğine doğrudan etki ettiğinden pil parametrelerinde de değişikliğe neden olmaktadır.

Işık 3-6-9-12-15-20-30 cm aralığında, HF 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 aralığında, zaman 5-10-25-40-55-70-90-120 dk aralığında akım yoğunluğu ise 4-8-12-16-20-25-30-50 mA/cm² aralığında incelenmiştir. Bu şekilde elde edilen Au-GS-Si hidrojen pilinin I-V, Voc, Isc gibi elektriksel parametreleri araştırılmış ve SEM fotoğrafları değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

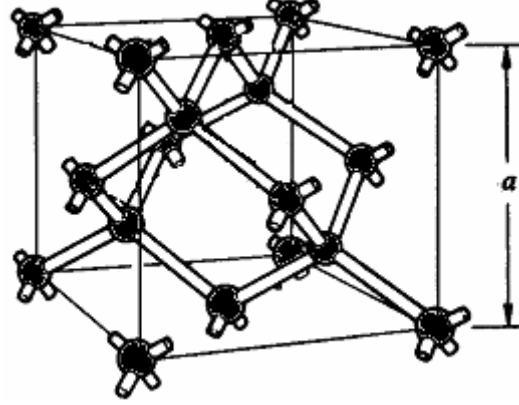
Çalışmalarımızda kullandığımız asıl malzeme olan gözenekli silisyumun temel malzemesi silisyumdur. İlk olarak gözenekli silisyumu tanımadan önce tek kristal silisyumu tanımlamakta fayda vardır.

2.1 Tek Kristal Silisyum

Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan yarıiletken olmasıyla beraber periyodik tablonun IV. grubunda yer alır ve enerji aralığı yaklaşık 1.10 eV dur. Silisyum ilk olarak 1823 yılında bulunmuştur. İlk silisyum detektör ise 1935 yılında Ollie tarafından yapılmıştır. Du Pont (1939) tarafından yüksek saflıkta elde edilmiştir. Czochralski (1952) tarafından aynı adlı teknikle CZ tek kristal olarak üretilmiştir. 1952 yılına gelindiğinde ise silisyum ticari olarak geniş skalalı tümleşik devre ve aygıt yapımının %80 den fazlasında kullanılmaktaydı. 1990 yılında silisyumdan elektrokimyasal yöntemle elde edilen, görünür bölgede fotolüminesans veren gözenekli silisyumun keşfiyle optik sistemlerde de kullanılmaya başlamıştır [19].

2.1.1 Tek Kristal Silisyumun Yapısı

Tek kristal silisyum saydam olmayan koyu gri renkli, parlak, sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Silisyum kristal ve kübik yapısı bakımından elmasa benzerlik gösterir ve yüzey merkezli kübik bir yapıya sahiptir(Şekil 2.1). Elmas yapısında kristalleşen silisyumun örgü sabiti $a = 5.43 \text{ Å}$ 'dur[20].



Şekil 2.1 Silisyumun kristal yapısı

2.1.2 Tek Kristal Silisyumun Fiziksel Özellikleri

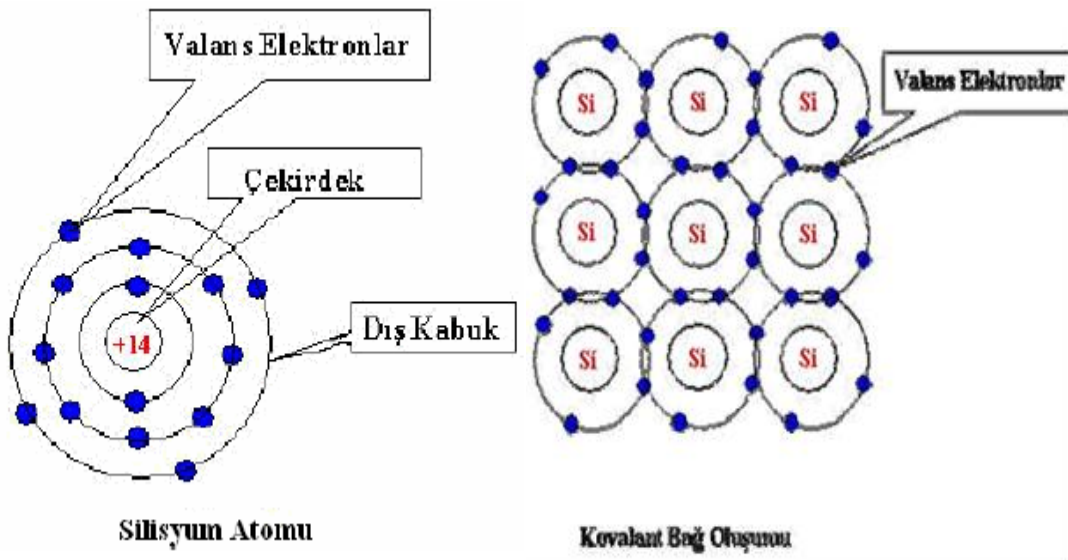
Silisyuma ait bazı fiziksel özellikler aşağıdaki şekilde belirtilmiştir(Çizelge 2.1)[20].

Çizelge 2.1 Silisyumun fiziksel özellikleri

Özellik	
Ergime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1420
Kaynama Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	2355
Sertlik (Mohs)	6.5
Özgül ısı kapasitesi (J/g.K)	0.7
Isıl iletkenlik (W/m.K)	150
Örgü parametresi (nm)	0.543
Yoğunluk (g/cm^3)	2.33
Yasak band genişliği, 300 K (eV)	1.1
Elektronların mobilitesi, 300 K ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	1350
Deliklerin mobilitesi, 300 K ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	480
Özden yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, 300 K (cm^{-3})	1.5×10^{10}
Dielektrik katsayısı	12
Kırılma indisi	3.9

2.1.3 Tek Kristal Silisyumun Kimyasal Özellikleri

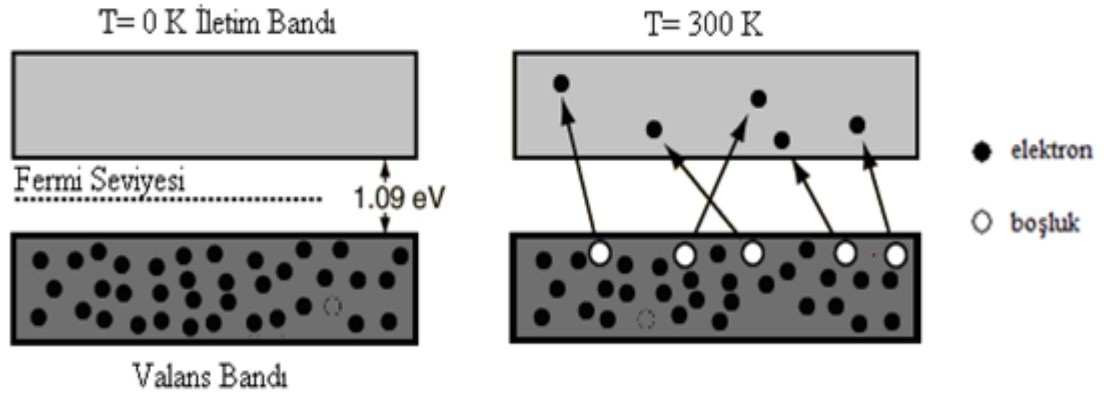
Günümüzde silisyum, elektronikte en çok kullanılan yarıiletkenlerdendir. Bu elementin atom numarası 14 olup, elektron konfigrasyonu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ 'dir. Bu dizilişten de görüldüğü gibi değerlik kuşağında dört elektron bulunan silisyum atomu kovalent bağlanmayla karakterize edilir(Şekil 2.2). Yarıiletken silisyumun elmas yapıya benzer tipteki kristal örgüsü kübik yapıya sahiptir[20].



Şekil 2.2 Silisyum atomunun yapısı ve kovalent bağ yapısı

2.1.4 Tek Kristal Silisyumun Elektriksel Özellikleri

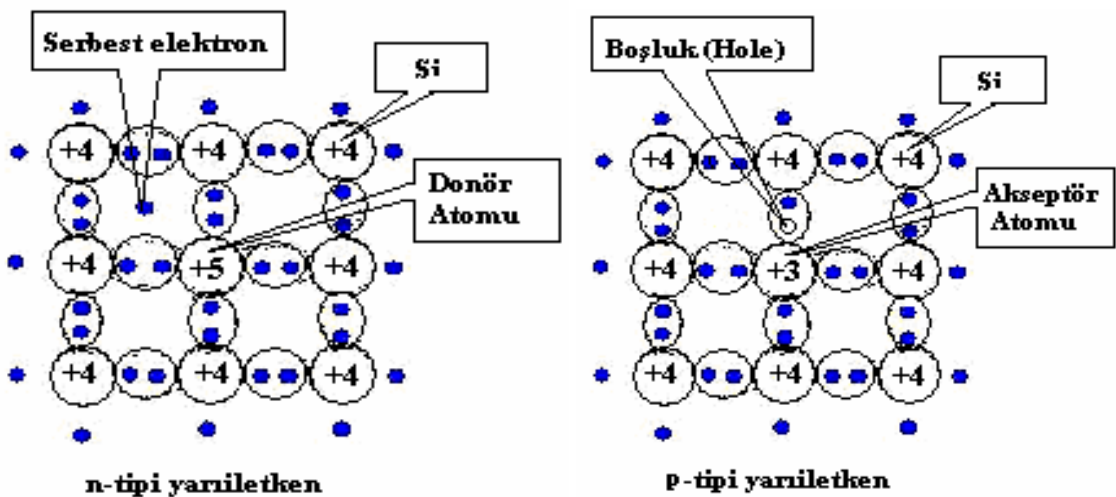
Katı cisimler elektrik özelliklerine göre; iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. İletkenlerde sıcaklık ile iletkenlik arasında ters orantı varken yarıiletkenlerde iletkenlik doğru orantılı olarak artmaktadır. Yarıiletkenlerin elektriksel öz dirençleri oda sıcaklığında 10^{-4} - 10^{10} (Ωcm) arasında değişmektedir. $T = 0\text{ K}$ ' de ise iyi birer yalıtkandır(Şekil 2.3)[21].



Şekil 2.3 Silisyumun band yapısı

İstenilen özelliklere sahip yarıiletken elde edebilmek, bazı katkı atomlarını yarıiletken malzemeye katkılama suretiyle mümkün olmaktadır.

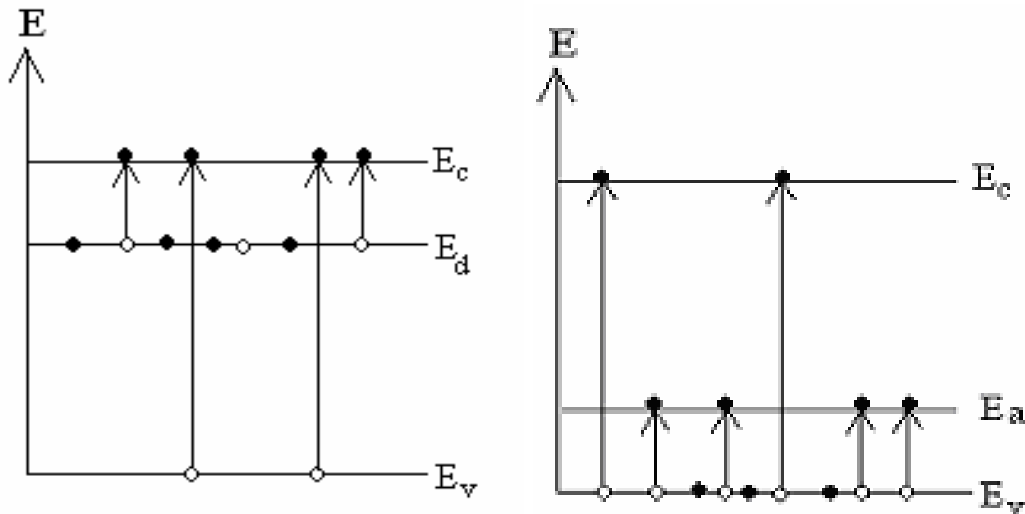
Silisyum atomuna periyodik cetvelin V. grup elementlerinden (As, Sb, P, N) biri katkıldığında n-tipi silisyum elde edilir. V. grup elementlerin son yörüngelerinde beş değerlik elektronu bulunur. Bu elektronların dördü silisyum atomunun dört değerlik(valans) elektronu ile kovalent bağ kurar, kalan elektron ise katkı atomuna zayıf elektriksel kuvvet ile bağlıdır ve çok kolay iyonlaşır. Yani katkı atomu silisyum kristaline bir elektron vermiş olur ve bu elektron örgü içinde bağımsız hareket edebilir. Katkı atomu elektron verdiği için donör, donör atomları ile katkılı silisyum ise n (negative) - tipi olur(Şekil 2.4)[21].



Şekil 2.4 (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletken band yapısı

Si atomunun Ga gibi periyodik cetvelin III. grup elementlerinden (In, Al, B) biri ile katkılanmasıyla p-tipi Si elde edilir. Ga'nın son yörüngesinde üç valans elektronu bulunur. Bu elektronların üçü Si atomunun üç değerlik elektronu ile kovalent bağ kurar, ancak Ga atomunun bir elektron eksikliği vardır ve bu nedenle de atomun elektron bağlarından biri boş kalır. Ga'nın dolmamış bu bağına Si'den kapılan bir elektron yerleşir ve delik elektronun yerine geçer. Böylece Si atomunun değerlik bandında bir delik oluşur ve örgü içerisinde hareket eder. Yani katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olur. Katkı atomu elektron aldığı için akseptör, akseptör atomları ile katkılı Si ise p-tipi olur. p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları delikler, azınlık yük taşıyıcıları ise elektronlardır[21].

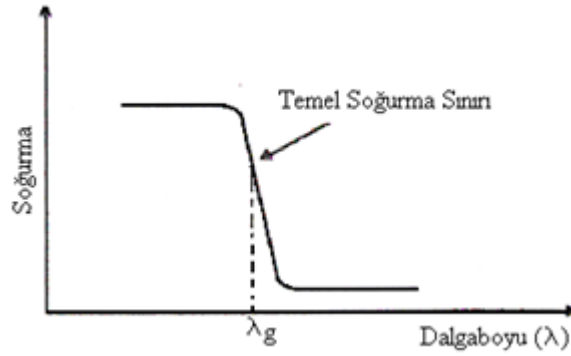
Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasak bandının içinde izinli enerji düzeyinin oluşmasına yol açar. Bu enerji düzeyi değerlik bandından biraz yukarıya yerleşir(Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Yarıiletkenlerde Yasak Band Genişliği

Yarıiletkenlerde soğurma oluşması birkaç mekanizma ile gerçekleşmektedir. Bunlardan en önemlisi, elektronların değerlik bandından iletim bandına geçmesiyle meydana gelmektedir. Bir elektron, yarıiletkene gelen elektromagnetik dalgadan bir foton ($h\nu$) soğurarak değerlik bandından iletim bandına geçtiğinde değerlik bandında bir delik oluşur. Yarıiletken malzeme üzerine düşen fotonun enerjisi en az malzemenin yasak

band genişliği kadar olmalıdır. Şekil2.6' de yarıiletkenler için şematik soğurma spektrumu görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi; dalga boylu fotonlar yarıiletken tarafından soğurulurken, dalga boylu fotonlar ise hemen hemen hiç soğurulmadan yarıiletken malzemeden geçerler. Bundan dolayı Şekil 2.6' da görülen bu iki bölgeyi ayıran sınır, temel soğurma sınırı olarak adlandırılır[19].

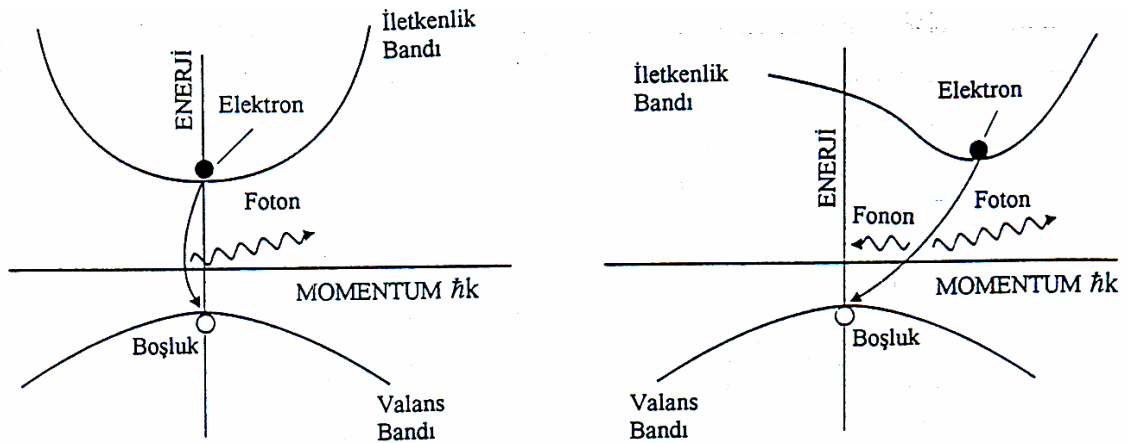


Şekil 2.6 Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu

Temel soğurma sınırında, yarıiletkenin soğurduğu fotonun, değerlik bandındaki bir elektronu, yasak band genişliğini aşarak iletim bandına çıkarması iki şekilde olabilir(Şekil2.7) :

(1) Doğrudan Geçişler

(2) Dolaylı Geçişler



Şekil 2.7 Bir iletkenkte direk ve indirek band geçişleri

(a) Doğrudan Geçişler: Bu tür geçişte iletkenlik bandının en alt noktası ile valans bandının en üst noktası arasında k değerinde bir fark yoktur ($\Delta \vec{k} \neq 0$). Çünkü soğurulan fotonun dalga vektörü çok küçüktür. Bu durumda elektron-delik etkileşmesi ihmal edilirse, soğurma katsayısı (α) ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^2 \quad (2.1)$$

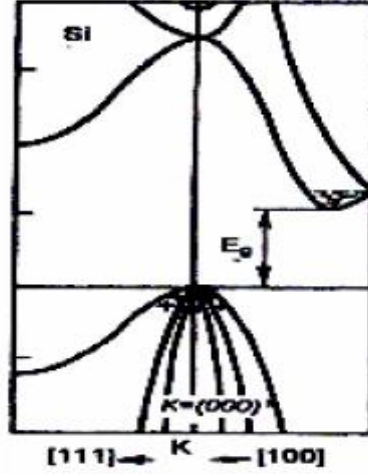
şeklindedir ve $(h\nu - E_g)^2$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini verir ($\alpha=0$ ise $h\nu=E_g$ olur).

(b) Dolaylı Geçişler: Bu tür geçişte iletkenlik bandının en alt noktası ile değerlik bandının en üst noktası arasında dalga vektörleri dolayısıyla soğurulma enerjileri farklıdır. Bu geçiş ancak hem fotonun soğurulması hem de fononun soğurulması ya da saçılması ile gerçekleşebilir. Bu durumda soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki bağıntı,

$$\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2 \quad (2.2)$$

şeklindedir ve $(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini ve fotonun enerjisini vermektedir. Burada E_{fn} : fononun enerjisidir.

Silisyum dolaylı geçişli bant yapısına sahiptir ve Şekil 2.8 'de her bant için üç $E(\vec{k})$ eğrisi ile gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, farklı kristalik doğrultular yönünde ([111] ve [100]) $E(\vec{k})$ eğrileri farklıdır. İletim bandının bir $E(\vec{k})$ eğrisi diğerlerinden daha küçük enerjili düzeylere yerleşmektedir. Bu kolun en düşük enerjili noktası iletim bandının dibi olarak tanımlanır. Silisyum değerlik bandının üç kolu vardır. Bunların maksimumları Brillouin bölgesinin merkezinde ($k=(000)$) yerleşmektedir. Değerlik bandının en büyük enerjisi ($k=(000)$) ve iletim bandının en küçük enerjisi Brillouin bandının farklı noktalarına yerleşir[19].

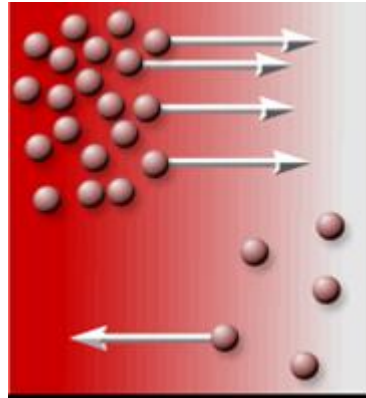


Şekil 2.8 Monokristal silisyumun bant yapısı (Caferov, 1998).

Gözenekli silisyumun bant yapısı ise üzerinde çokça tartışılan bir konudur. Canham, Lehmann ve Gosele, GS yapıyı, kristal Si üzerindeki küçük boşluklar olarak, yani bir tür kuantum kuyu şeklinde tanımlamışlardır. Kuantum kuyusundaki, iletkenlik bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar potansiyel engelle sınırlandırılırlar. Bu sınırlandırma sonucunda valans bandından iletkenlik bandına en düşük enerjili optik geçişin enerjisi artar ve dolayısıyla bant aralığı büyür. Bu da gözenekli silisyumun direkt geçişli bant yapısına sahip olmasını ve bu nedenle oda sıcaklığında fotolüminesans vermesini destekler [18].

2.1.5 Yarıiletkenlerde Difüzyon(Yayılım)

Atomların ısı enerjisi ile bir denge konumundan diğer denge konumuna atlaması difüzyon olarak adlandırılır(Şekil 2.9).



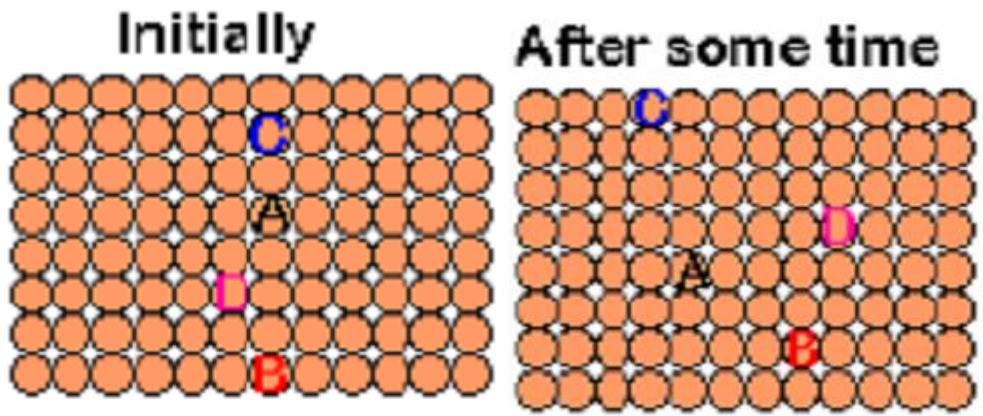
Şekil 2.9 Malzeme içerisindeki atomların hareketi

Eğer taşınan atomlar, saf malzemenin kendi atomları ise olay özdifüzyon, katkı atomları yarıiletkende hareket ederse difüzyon olarak adlandırılır[19].

Özdifüzyon (kendi kendine difüzyon)

Saf bir malzemede öz atomların bir denge konumundan diğerine atlamasına denir.

Silisyum atomunun silisyum kristallerine taşınması örnek olarak verilebilir(Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Özdifüzyon (kendi kendine difüzyon)

Katkı maddelerinin malzemede yayılması ile oluşan difüzyon

Malzemeye katkı yapıldıktan sonra katkı atomlarının malzemede taşınması olarak tanımlanır. Bor katkı atomlarının silisyumda taşınması örnek olarak verilebilir.

En hızlı difüzyon gazlarda olup sıvılarda ise daha yavaş olur. Difüzyon katılarda da meydana gelebilir; bu, atomlara birbirlerinin etrafında hareket edip yer değiştirme olanağını sağlayan kristal örgü kusurlarından oluşur. Katılarda atomlar denge konumları çevresinde küçük genliklerle titreşirler. Bu atomların enerjileri aynı değildir[19].

Atomların titreşim enerji dağılımı şu şekilde verilebilir.

$$N = N_t \exp(-E/kT) \quad (2.3)$$

Burada,

T: mutlak sıcaklık,

N_t atomların toplam sayısı,

N: E enerjili atomların sayısıdır.

2.1.6 Difüzyon Mekanizmaları

Katılarda atomların bir denge konumundan diğerine elementer atlamalarını kolayca ifade edebiliriz. Atomların kristaldeki bir denge konumundan diğerine atlama yörüngelerine bağlı olan difüzyon mekanizmaları vardır[19].

Bunlar şunlardır:

- a) Çift Yerdeğişme Mekanizması
- b) Halka Yerdeğişme Mekanizması
- c) Arayer Yerdeğişme Mekanizması
- d) Boşluk Yerdeğişme Mekanizması
- e) Karmaşık (dissosiyatif) Yerdeğişme Mekanizması

*Bu mekanizmalar tek kristalde oluşur.

a) Çift Yerdeğişme Mekanizması

İki komşu atomun direkt olarak yer değiştirmesi olarak tanımlanır (Şekil.2.11a)
En basit difüzyon mekanizmasıdır.

Atomların bu tip hareketleri için kristal kusurlara gerek yoktur.

b) Halka Yerdeğişme Mekanizması

Halka şeklinde yerleşmiş dört atomun aynı zamanda hareketlenmesiyle oluşan mekanizmadır. Bu tip mekanizmalarda her atom bir örgü parametresi uzaklığı atlamaktadır (Şekil2.11 b).

Kristallerde bu tür hareketlerin oluşma olasılığı çok küçüktür.

c) Arayer Yerdeğişme Mekanizması

Katkı atomları kristalin örgü yapısı arasındaki boşluklarda ilerliyorsa bu tür mekanizmalardır. Yani atomun bir arayer pozisyonundan komşu arayera atlamaları

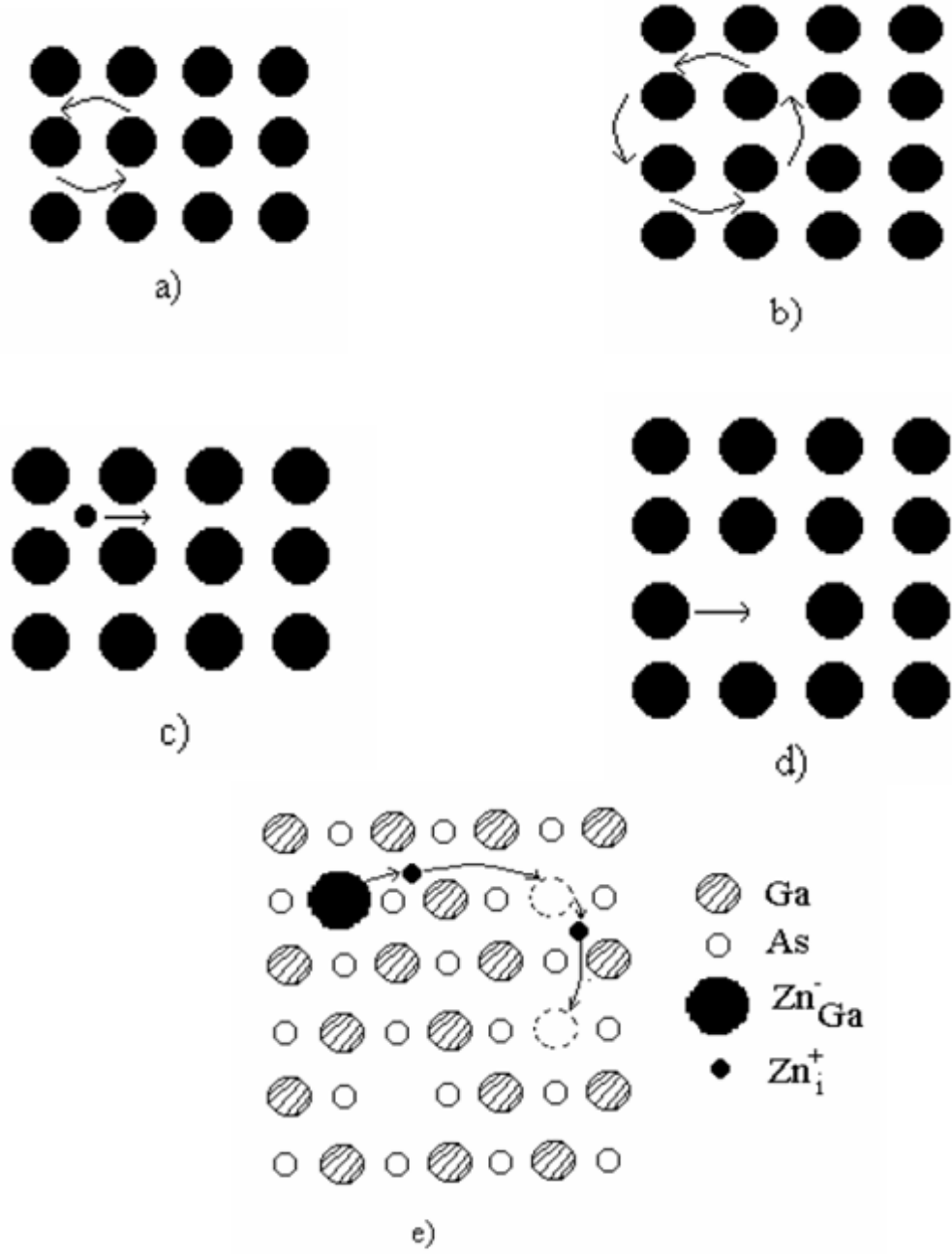
arayer yerdeğişmesi mekanizmasının temelidir. Bu mekanizma dokular arası difüzyon mekanizması olarak da bilinir (Şekil 2.11c).

d) Boşluk Yerdeğişme Mekanizması

Kristalin bir örgü noktasındaki atomun başka bir boş örgü noktasına geçmesidir (Şekil 2.11d).

e) Karmaşık (dissosiyatif) yerdeğiştirme

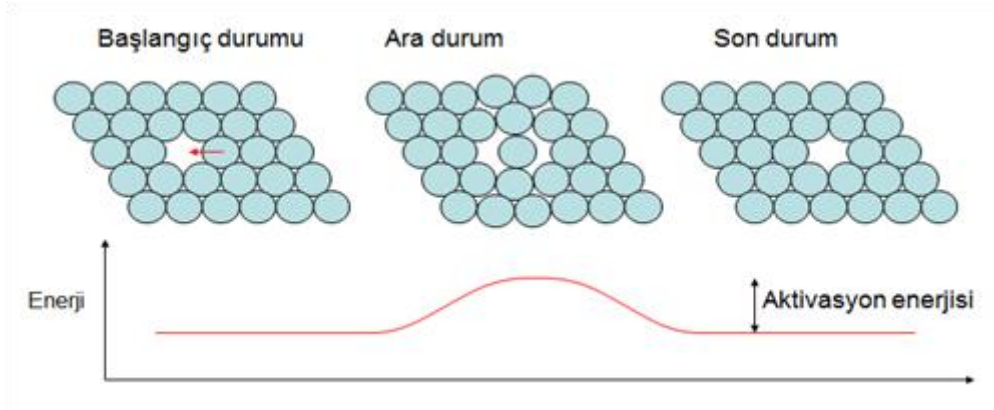
Arayer ve vakasiyon yer değişimi mekanizmalarının birleşimidir. Atom, örgü düğümünden arayer konumuna geçer. Arayer pozisyonları ile hareketinden sonra yeniden başka bir vakansiyona geçer (Şekil 2.11e).



Şekil 2.11 Atomların difüzyon mekanizmaları: a) Çift yerdeğişme, b)Halka yerdeğişme, c) Arayer yerdeğişme, d) Boşluk yerdeğişme ve e) Çinkonun GaAs de karmaşık yerdeğişmesi

2.1.7 Aktivasyon Enerjisi ve Difüzyon Kuralları

Difüzyon için aktivasyon enerjisi kristal içindeki bir atomun bulunduğu noktadan başka bir noktaya sıçraması için gerekli olan enerjidir(Şekil 2.12). Arayer yerdeğişmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi boşluk tipi difüzyon mekanizması için gerekli olan enerjiden küçüktür. Q (arayer) < Q (boşluk) Çünkü boşluk oluşturmak için enerjiye ihtiyaç yoktur ve boşluk tipi difüzyon mekanizmasında örgü atomlarının bağları kırıldığı için aktivasyon enerjisi daha fazladır [21].



Şekil 2.12 Difüzyon için aktivasyon enerjisi

Difüzyon Kuralları ilk defa 1855 yılında Adolf Fick tarafından verilmiştir ve bunlar difüzyonun birinci ve ikinci (veya Fick'in birinci ve ikinci) kuralları olarak tanımlanır [24].

1.Fick Kuralı: Bir malzeme içinde atomların yayılım hızı, birim zamanda birim düzlem alanı boyunca geçen atom sayısı olarak tanımlanan akı "J" ile ölçülebilir. 1. Fick yasası net atom akısını açıklar ve

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (2.4)$$

bağıntısıyla verilir. Burada,

J : Difüzyon akısı

D: Difüzyon katsayısı

dN / dx : Konsantrasyon gradyenti olarak verilir.

(-) işareti atomların akış yönünün, konsantrasyon gradyentinin küçüldüğü yönde gerçekleştiğini göstermektedir. Difüzyon katsayısı,

$$D = \alpha a^2 v \quad (2.5)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada

α : kristal örgüsüne bağlı boyutsuz katsayısı

a : örgü sabiti

v : atomları ortalama atlama frekansıdır.

2.Fick Kuralı: Konsantrasyonun zamanla değişme hızının konsantrasyonun ikinci türevine bağlılığını göstermektedir. Eğer süreklilik denklemini 1.Fick kuralında (2.4) yerine yazarsak 2. Fick kuralını (2.4) elde etmiş oluruz[21].

$$\frac{dN}{dt} = - \frac{dJ}{dx} \quad (2.6)$$

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (2.7)$$

2. Fick kuralının çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon için sınır şartları şunlardır.

$$N(x,0)=0 \quad (2.8)$$

$$N(0,t)=N_0 \quad (2.9)$$

Bunların sonucunda 2.Fick denkleminin çözümü,

$$N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.10)$$

şeklindedir. Burada,

N_0 : örnek yüzeyindeki ($x=0$) sabit konsantrasyonu

$\text{erf}(z)$: Gauss hata fonksiyonudur ve

$$\text{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (2.11)$$

bağıntısıyla gösterilir.

Difüzyon katsayısının sıcaklıkla bağıntısı Arrhenius türünde bir bağıntıdır. Katılarda difüzyon katsayısı, Arrhenius kuralına uygun olarak değişim gösterir.

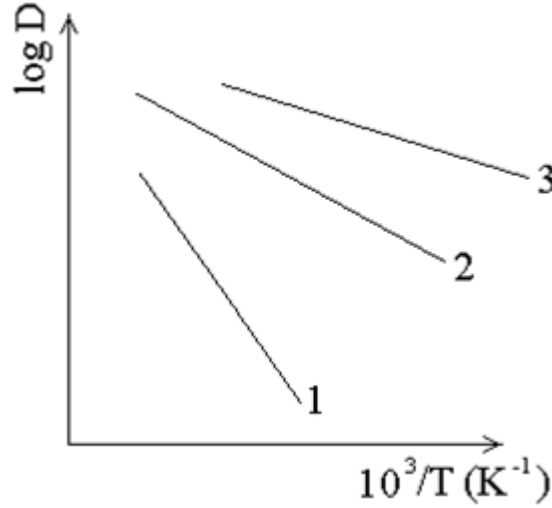
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-G}{kT}\right) \quad (2.12)$$

Burada,

G : Difüzyonun aktivasyon enerjisi,

D_0 : Atomların titreşim frekansı ve atlama mesafesi ile bağlı olan üstel fonksiyonun çarpanıdır.

Farklı mekanizma ile tek kristalde (1, 2) ve polikristalde (3) hareket eden atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığını göstermektedir. Difüzyon katsayısının en küçük değerleri ve en büyük aktivasyon enerjisi boşluk mekanizması ile hareket eden atomlar için gösterilmektedir. Tane sınırları ile difüzyona uğrayan atomlar en büyük D ve en küçük G parametrelerine sahiptir. Arayer yolları ile hareket eden atomlar için difüzyon parametreleri boşluk ve tane sınırları ile difüze olan atomların parametrelerinin arasında yerleşmektedir. Şekil 2.13'de farklı mekanizmalar ile hareket eden atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığını göstermektedir[21].

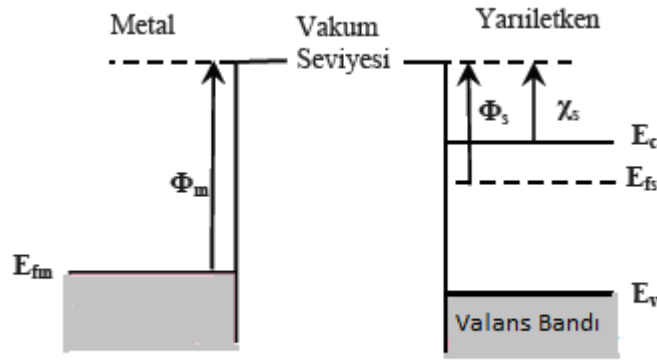


Şekil 2.13 (1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı.

2.1.8 Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılması, ancak, uygun kontakların kristallere uygulanması ile mümkündür. Kontak, iki maddenin en az dirençle, idealde ise, sıfır dirençle temas ettirilmesidir. İdeal kontak, yüzeylerin parlak, temiz ve pürüzsüz olmasına bağlıdır. İki iletken kontak haline getirildiği zaman aralarındaki yük alışverişinden sonra, yeni denge durumu meydana gelir ve her iki maddenin Fermi enerji düzeyleri eşitlenir. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metalin kontak durumunda, bu dipol tabakası kontağın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden oluşur. Oluşan bu kontak, elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır. Eğer, kontağı oluşturan maddelerden biri metal diğeri yarıiletken ise oluşacak kontak omik ya da doğrultucu olabilir. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki geçişleri, kontakta oluşan bir potansiyel engeli nedeniyle zorlaşır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir. Bu olayı açıklamak için bir metal/n-tipi yarıiletken kontağın nasıl oluştuğunu dikkate alabiliriz. Oda sıcaklığında, yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s , yarıiletkenin elektron yakınlığı χ_s ve $\phi_m > \phi_s$ olsun. Kontakta önceki durumda, Şekil

2.14’de görüldüğü gibi, yarıiletkenin Fermi düzeyi metalin Fermi düzeyinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra, yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan daha küçük olduğundan, yarıiletkenin yüzeyinden metale elektronlar geçer ve geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük geçişi, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi düzeyi ile aynı seviyeye gelinceye kadar devam eder. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.15’de görüldüğü gibi $(\phi_m - \phi_s)$ kadar alçalır. Sonuç olarak, kontakta bir dipol tabakası oluşur. Bu dipol tabakası nedeniyle yarıiletkenin yüzeyinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engel yüksekliği difüzyon potansiyeli cinsinden $eV_{dif} = (\phi_m - \phi_s)$ şeklinde ifade edilir. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşır. Ayrıca, metal tarafındaki engel yüksekliği de $\phi_b = (\phi_m - \chi_s)$ kadardır[19].



Şekil 2.14 Kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramları

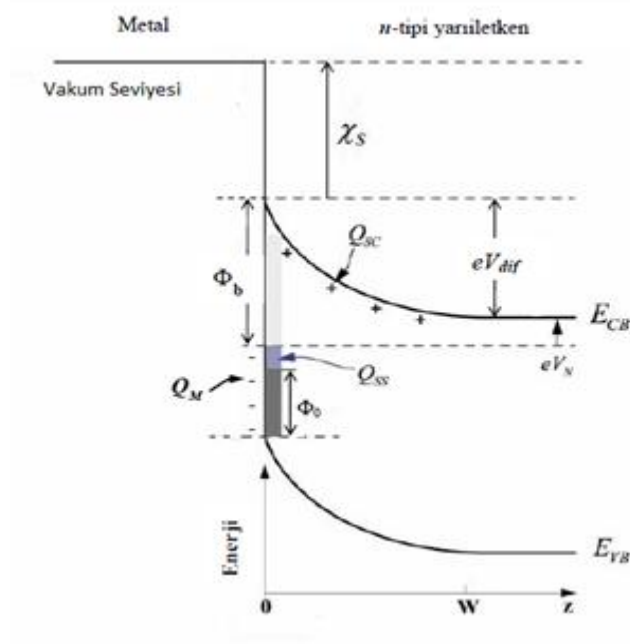
Şekil 2.15, termal dengedeki metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji-bant diyagramını göstermektedir. Şekil 2.15 ’deki ϕ_0 yük nötrallik seviyesidir. ϕ_0 ’nın üstünde akseptör tipi arayüzey halleri ve altında donör tipi arayüzey halleri olduğu varsayılır. Mutlak sıfır sıcaklığında yük nötrallik seviyesinin üzerindeki arayüzey halleri boş ve altındakiler doludur. Boş akseptör seviyeleri nötr (yüksüz) ve dolu donör seviyeleri nötr olduğundan boş ve dolu donör düzeylerini ayıran bu seviyeye yük nötrallik seviyesi denir. Mutlak sıfır sıcaklığında, Fermi seviyesi ϕ_0 ’ın altında olduğu zaman bu iki seviye arasında net bir pozitif yük mevcuttur. Fermi düzeyi ϕ_0 ’ın yukarısında olursa bu iki seviye arasında net bir negatif yük mevcuttur. Yine, Şekil

2.15'deki Q_{ss} ve Q_{sc} , sırasıyla, arayüzey yüklerini ve uzay yüklerini temsil ederler. Kontakın yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, iyonize olmuş donörlerin neden olduğu ve yarıiletken içinde hareketsiz olmalarından dolayı, bunlara yüzey yükü olarak değil bir yük dağılımı olarak bakmak gerekir. Bundan dolayı metal-yarıiletken kontakın yüzey tabakası uzay yükü tabakası olarak adlandırılır. Kontaktaki potansiyel engelinden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir. Bu tabakanın w kalınlığı ve difüzyon potansiyelinin değeri iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna bağlıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların ısı yolla kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engelini aşmasına yetebilecek büyüklükte olduğu zaman kontakten eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı geçer, bu durumda net akım sıfırdır. Eğer yarıiletkene bir $-V$ gerilimi uygulanırsa, yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır. Fakat, metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez ve I_0 değerinde kalır. Bu durumda, oluşan net akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

bağıntısıyla verilir[19].

Dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artacaktır. I net akımı pozitifdir. Bu besleme durumuna ($V \gg kT/e$) düz besleme durumu denir. Yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulandığında iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu besleme durumuna ($V \ll -kT/e$) ters besleme durumu denir.



Şekil 2.15 Kontakta sonra oluşan metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı.

Schottky diyodu kapasitans özelliklerine sahiptir(Şekil 2.16). Schottky diyoda dışarıdan gerilim uygulandığında, devrede ilk anda oluşan akımın etkisiyle, elektrik yükleri değişmektedir. Buradaki olaylar kondansatördeki olaylara benzer. Schottky diodun kapasitansı, engel kapasitansı olarak adlandırılır. Diferansiyel engel kapasitansı,

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.14)$$

olarak verilir. Burada

dQ: engel bölgesindeki yük değişimi,

dV: uygulanan gerilimin değişimidir.

Metal-yarıiletken yapı düzlemsel kondansatöre benzer. Bu nedenle Schottky kontağın kapasitansı aynı formülle elde edilebilir.

$$C = \frac{S\epsilon\epsilon_0}{L_0} \quad (2.15)$$

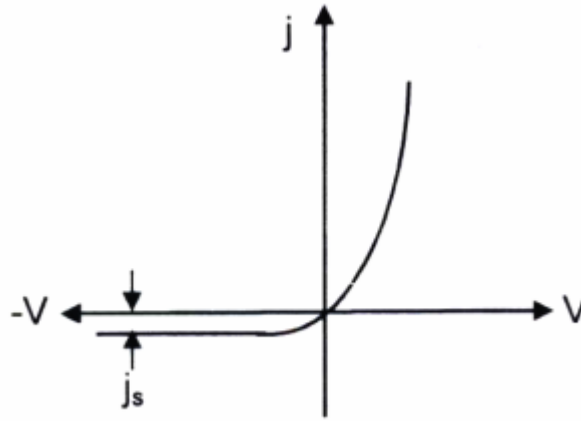
Burada L_0 hacimsel yüklü bölgenin veya eklem kalınlığı şu şekilde verilir.

$$L_0 = \sqrt{\frac{2\phi_k \epsilon \epsilon_0}{en}} = \sqrt{\frac{2(\phi_m - \phi_s) \epsilon \epsilon_0}{e^2 n}} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki iki denklemden, Schottky diyotun kapasitansı,

$$C = S \sqrt{\frac{en \epsilon \epsilon_0}{2\phi_k}} \quad (2.17)$$

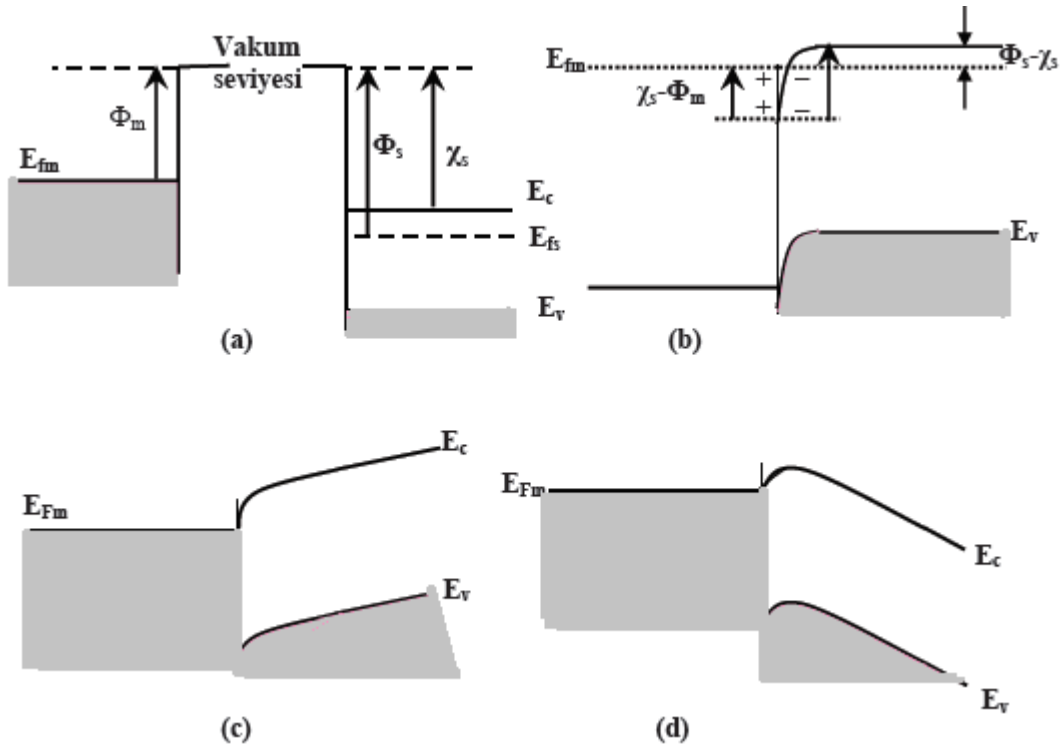
bağıntısı ile verilir. S: diyotun alanıdır.



Şekil 2.16 Schottky diyotun akım-gerilim karakteristiği.

$\phi_m < \phi_s$ için, kontakta önceki durumda, yarıiletkenin Fermi düzeyi metalin Fermi seviyesinden $(\phi_m - \phi_s)$ kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.17.a'da görülmektedir. Kontakta sonra ısı denge durumunda, elektronlar metalden yarıiletken doğru geride pozitif boşluklar bırakarak geçerler ve bu durumda yarıiletken yüzeyinin n-tipi niteliği artar. Yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlar bir negatif yüzey yükü katmanı meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride pozitif bir yüzey yükü tabakası meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum, Şekil 2.17b'de görülmektedir. Eğer metal tarafına pozitif bir +V gerilimi uygulanırsa bu durumda yarıiletkenden

metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 2.17c). Eğer yarıiletken tarafına pozitif bir $+V$ gerilimi uygulanırsa, elektronların karşılaştıkları engel yüksekliği yine çok küçük olacaktır ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene doğru akacaklardır (Şekil 2.17d). Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde kolayca hareket edebilirler. Bu özellikteki kontaklara omik kontaklar denir. Omik kontakta bir $+V$ gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale bir negatif $-V$ gerilimi uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara enjeksiyon kontakları da denir[23] .



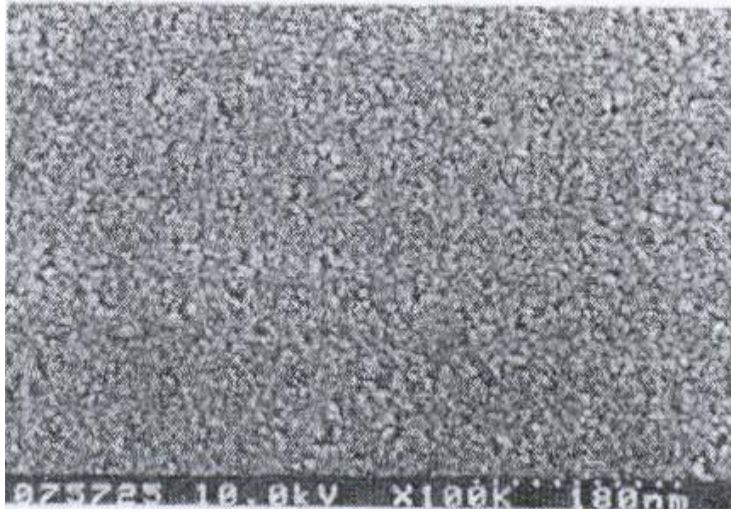
Şekil 2.17 $\phi_m < \phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji-bant diyagramı a) kontak öncesi, b) kontak sonrası, c) ters besleme altında, d) doğru besleme altında.

2.2 GÖZENEKLİ SİLİSYUM

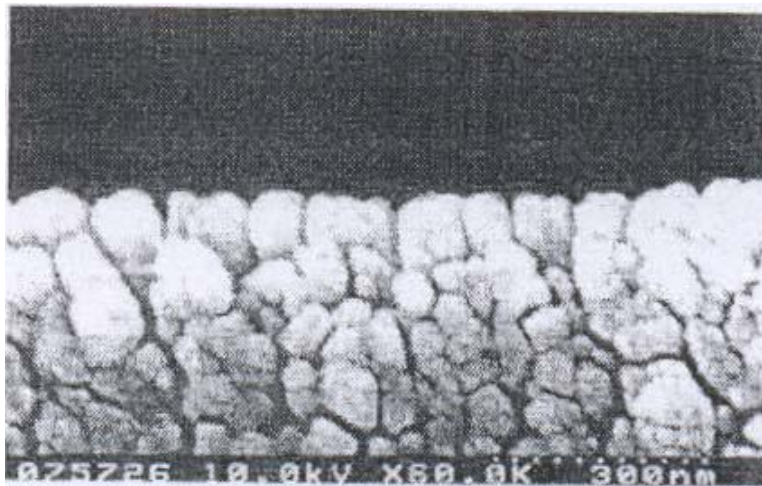
2.2.1 Gözenekli Silisyumun Tarihsel Gelişimi

Gözenekli Silisyum (GS), ilk kez 1956 yılında Uhlir tarafından hidroflorik asit içinde anodik gerilim altında tek kristal silisyum yüzeyinde oluşturulmuştur[1].

Uhlir silisyumun elektriksel aşındırılmasıyla (parlatılmasıyla) ilgili olarak çalışırken uygulanan anodik akımın uygunluğu halinde silisyum yüzeyinde kahverengimsi bir tabaka oluştuğunu gözlemlemiş ancak bunu deneyleri için bir sorun olarak görmüştür. Daha sonra Turner bu tabakayı daha detaylı olarak araştırmış ve bu tabakaya “Gözenekli Silisyum” adını vermiştir.



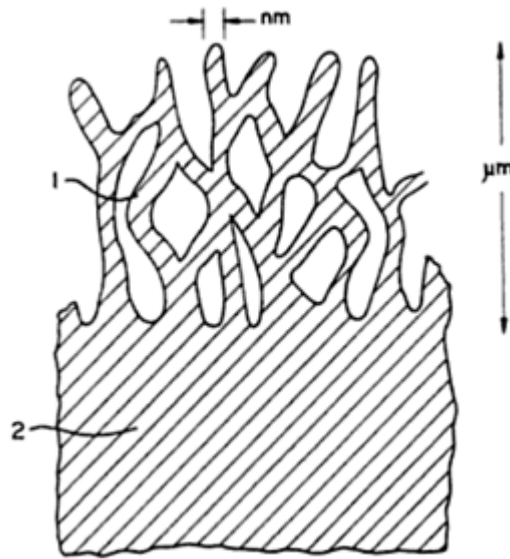
(a)



(b)

2.18 Gözenekli silisyum yapının (a) üstten görünüşünün SEM fotoğrafı, (b) kesit görünüşünün SEM fotoğrafı (Kwon vd., 2003).

Gözenekli silisyum film tek kristal silisyumun hidroflorik asit tabanlı elektrolitlerle elektrokimyasal yöntemle aşındırılması ile oluşturulmaktadır. Silisyum yüzeyi, düşük pH'lı hidroflorik asit etkisiyle aşınmamaktadır, ancak silisyumun anot olarak kullanıldığı anodizasyon işleminde uygulanan potansiyel fark silisyumun aşındırılmasını sağlar. Bu sistemlerde silisyum anot gibi davranır ve katot olarak da platin kullanılır. Anot ile katot arasında gerilim farkı oluşturulduğunda silisyum altlık üzerinde birkaç mikrometre kalınlığında gözenekli silisyum film oluşur. Birçok çalışmada gözenekli silisyumun yapısal ve elektriksel özelliklerinin üretim koşullarına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Bu bağlamda anodizasyon sürecinde tek kristal silisyum içinde bir çeşit birbirine bağlı süngerimsi, yüzeyleri hidrojen ile kaplı sütunsu yapılar oluştuğu söylenebilir ve Şekil 2.18'de bu yapının şematik gösterimi verilmiştir[2].



Şekil 2.19 (1) Gözenekli Silisyum tabakanın (2) tek kristal silisyum üzerinde şematik gösterimi [4].

Lehman ve Gösele'nin (1991) çalışmalarında belirtildiği gibi, Şekil 2.19'da görülen gözenek genişliğinin ve gözenekli silisyum yapının elektriksel, morfolojik ve optik özelliklerinin; anodizasyon esnasındaki akım yoğunluğu, hidroflorik asit konsantrasyonu, aydınlatma, tek kristal silisyumun tipi ve öz direnci, anodizasyon süresi ile değiştiğini daha sonra inceleyeceğimiz birçok farklı çalışmada verilmiştir[2].

1970-1980 yılları arasında gözenekli silisyum, geniş yüzey alanı, gözenekli silisyumun iç yüzeyi anodik aşındırma sonrasında tamamen hidrojenle kaplı olması, bununla birlikte havada oksidasyona oldukça duyarlılığı (çok hızlı oksitlenmesi), kimyasal sensör uygulamaları alanlarında ilgiyi üzerine çekmiştir.

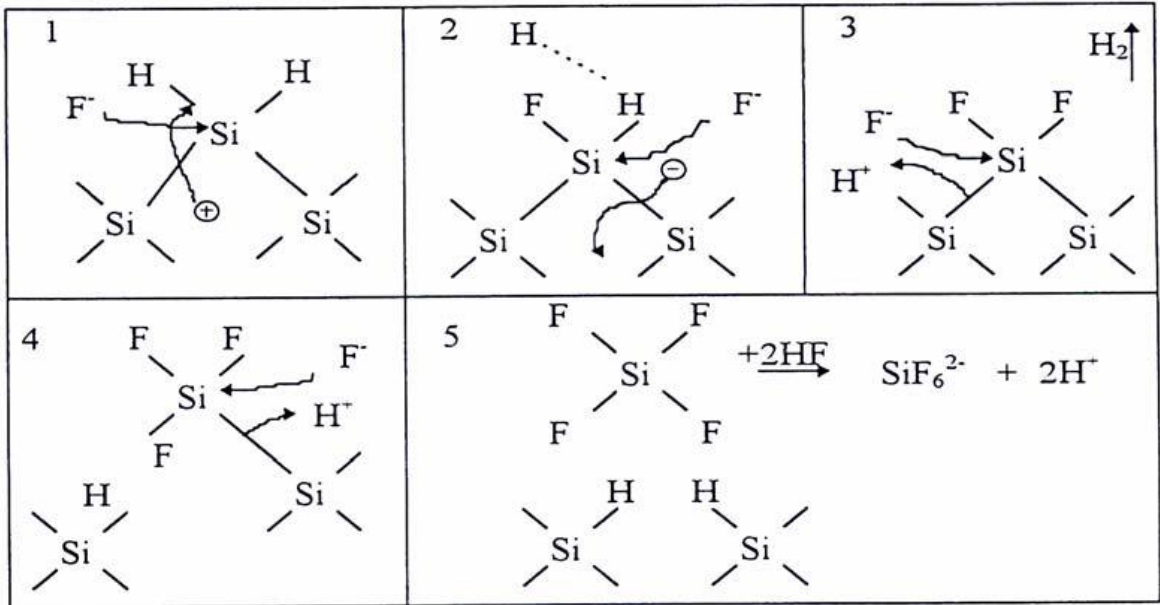
Canham (1990) tarafından oda sıcaklığında gözenekli silisyumun güçlü görünür bölge fotoluminesansını ve dolayısıyla bu filmlerin yasak band genişliğinin silisyumun yasak band genişliğinden fazla olduğunu keşfetmiştir[3].

Bu çalışmalardan sonra gözenekli silisyum ve gözenekli silisyum esaslı yapılara dayalı çalışmalar ilgi odağı olmuş ve kısa zamanda çok yol almıştır.

Gözenekli silisyum oluşumunun hidroflorik asit tabanlı çözelti içerisinde tek kristal silisyumun elektrokimyasal olarak aşındırılması ile gerçekleştiği belirtildikten sonra gözenekli silisyum oluşma süreci incelenmelidir.

2.2.2 Gözenekli Silisyumun Hazırlanması

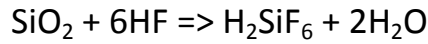
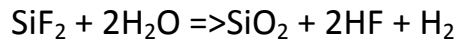
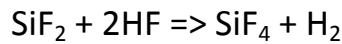
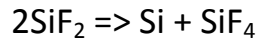
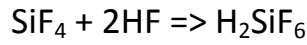
Gözenekli silisyumun nasıl meydana geldiğini anlayabilmek için HF asit içindeki elektrokimyasal anodizasyonu açıklamak gereklidir. Yüzeyde aşınma, silisyumun anodik kutuplanmasını sağlayacak bir potansiyel etkisi altında gerçekleşir. Aşınma, HF konsantrasyonuna bağlı kritik akım yoğunluğundan düşük akım yoğunluklarında gerçekleşir. GS'nin iç yüzeyi Si-H bağları ile kaplıdır. Çözünme ile boşluk oluşma mekanizması Şekil 'de görülmektedir.



Şekil 2.20 Gözenekli silisyumun oluşum mekanizması [4]

1-5 durumları F, H, Si, boşluklar ve elektronların tepkime sırasını ve işleyiş mekanizmalarını göstermektedir. Hidrojen bağları ile dolu olan Si yüzeyine bir boşluk geldiğinde flor iyonları tarafından bir akın oluşur ve Si-H bağı kırılarak Si-F bağı kurulur (Şekil 2.20-1). Bu kurulan bağdaki F'nin polarize etkisi ile başka bir F – iyonu da yüzeye yaklaşır ve diğer H bağlarını kırar (Şekil 2.20-2). Olaylar zinciri devam ederken bu etkenler H₂ molekülünün oluşumuna neden olur ve oluşan H₂ molekülleri sistemi terk eder (Şekil 2.20-3). Si-F bağlarının oluşturduğu polarizasyondan dolayı Si-Si arka bağlarındaki elektron yoğunluğu azalır. Bu zayıflamış bağlara F- konumlanır (Şekil 2.20-4). Bu durumda Si-F yoğunluğu artar ve SiF₆ + 2H⁺ tepkimesi oluşur (Şekil 2.20-5) [2].

Nasır ve arkadaşları GS oluşum mekanizması için aşağıda reaksiyonları vermiştir.



GS oluşumunu açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bazı modeller Si-HF sisteminin deneysel koşullarla ilişkisini kuran çözünme mekanizması ile ilgilidir. Bazı modeller ise silisyum elektrolit sistemlerde elektrik alanının yeniden dağılımına dayanır. Kuantum sınırlamanın etkin olduğunu belirten modeller de vardır. Aşağıda bu modeller verilmektedir.

a) Beale modeli

Beale modelinin temel çatısı sistemden akım geçişi üzerine kuruludur (Beale, 1985). Si tabaka üzerinde GS'nin meydana gelebilmesi için sistemden bir akım geçmesi gerekir. Bu durumda Si anot, platin tel ise katot işlevi görür. Elektrik alanıyla birlikte yüzeyde bölgesel düzensizlikler meydana gelir. p-tipi silisyumda Si-HF sisteminde kutuplanma kolaylıkla gerçekleşir ve boşluk oluşumu başlar. Ancak n-tipi Si için sadece akım geçişi yeterli değildir. Aydınlatma ile gözenekler oluşturulabilir. Si'deki akım geçişi ve aydınlatma yüzey bozuklukları ve bölgesel boşlukların oluşumuna neden olur. Bu olay gözeneklerin büyümesini başlatarak yüzeyin düzgün olmayan çözünmesine yol açar. Çözünme zinciri devam eder[22] .

Beale modelinin temel avantajı katı sistemlere uygun olmasıdır.

b) Difüzyonla Sınırlı Model

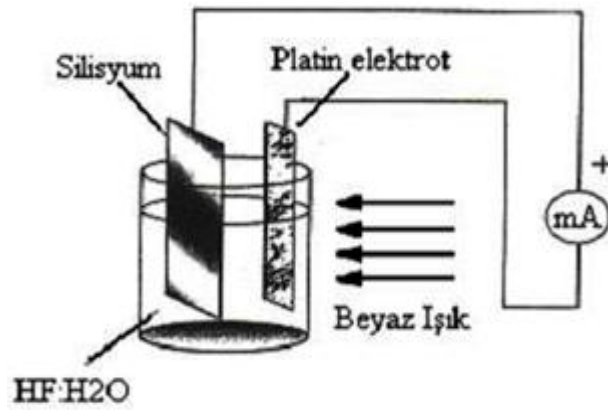
Difüzyonla Sınırlı Model, GS oluşumunu rastgele adımlar olarak tanımlar. Gözenekler oluşurken boşluk silisyum yüzeyinin içine sızar ve silisyum atomları ile oksitleşme reaksiyonuna girer. Bunu elektronların difüzyonla yüzeyden ayrılması izler. Bu hareketin doğası rastgeledir ve rastgele boşlukların oluşumuna neden olur. Reaksiyon zinciri devam eder ve yüzeyde düzensiz çözünme ile birlikte gözenek oluşumu sürer. HF konsantrasyonu ve uygulanan potansiyel, gözeneklilik sürecini kontrol eder [22] . Bu modelin temel avantajı difüzyon fiziği ve elektrokimyasal olaylarla uyumdur.

c) Kuantum Sınırlama Modeli

Gözenekli silisyumun doğası kuantum modeli ile de açıklanmıştır. Gözenekli silisyumun yapısı, modele göre, kuantum noktalarından (quantum dot) meydana gelir. İletkenlik bandındaki elektronlar bu nano-boyutlardaki potansiyel engelleri ile sınırlıdır. Ancak bu potansiyel engelini aşabilecek kadar yüksek enerjiye sahip olan yük taşıyıcıları kristalde etkin olabilirler. Böylelikle en düşük enerjili elektron geçişinin enerjisi artar. Bu da gözenekli silisyumun neden oda sıcaklığında fotoluminesans verdiğini açıklar. Geçiş enerjisinin giderek yükselmesi ile bu süreç gözenekli silisyumda boşluk üretimini durdurur ve üst limit belirlenir [22]. Bu model daha sonra yapılan birçok yayınla desteklenmiştir.

3.1 Gözenekli Silisyumun Elde Edilmesi ve Karakteristiklerinin Belirlenmesi

GS/Si yapılar, elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile n-tipi (Sb katkılı) [111]yönelim ve $1 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$ öz dirençli tek kristal silisyum üzerinde elde edilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.

Yaptığımız çalışmalarda gözenekli silisyum anodizasyon (hazırlama) koşulları değiştirilerek üretildi.

Değiştirilen hazırlama koşulları;

1.Anodizasyon Zamanı: (HF:dH₂O çözeltisi oranı 1:3, 15 mA/ cm² akım yoğunluğu, n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm, ışık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası mesafe 8 cm sabit tutuldu. Anodizasyon süresi 5-10-25-40-55-70-90-120 dakika olarak değiştirildi.

2.Uygulanan Işığın Şiddeti: (HF:dH₂O çözeltisi 1:3 oranı ,15 mA/ cm² akım yoğunluğu, n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm sabit tutuldu. Işığın şiddeti ise 3-6-9-12-15-20-30 cm olarak değiştirildi.)

3.Uygulanan Akım Yoğunluğu: (HF:dH₂O çözeltisi 1:3 oranı, n-tipi Si ile Pt elektrot arası mesafe 1 cm, ışık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası uzaklık 8 cm, anodizasyon süresi 55 dakika sabit tutuldu. Akım yoğunluğu 4, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 50 mA/ cm² olarak değiştirildi.

4.HF:dH₂O oranının değiştirilmesi: (15 mA/ cm² akım yoğunluğu, n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm, ışık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası mesafe 8 cm, anodizasyon süresi 55 dakika sabit tutuldu. HF:dH₂O çözeltisi oranı 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 olarak değiştirildi.

3.1.1. Anodizasyon Süresinin (Zamanın) Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması

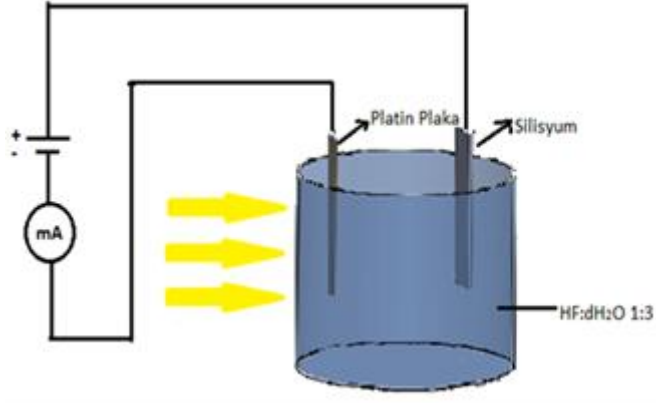
Yapılan bu çalışmalarda gözenekli silisyumun oluşabilmesi için gerekli olan sürenin değiştirilmesi ile farklı gözenekli silisyum yapılar elde edildi.

- HF:dH₂O; 1:3 çözeltisi,
- 15 mA/ cm² akım yoğunluğu,
- n-tipi Si ile Pt elektrot arası mesafe 1 cm,
- Işık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası mesafe 8 cm,
- Anodizasyon süresi 5-10-25-40-55-70-90-120 dakika

Elde edilen örneklerin Açık devre geriliminin ve kapalı devre akımının zamana bağlı ölçümleri yapıldı. Örneklerin Akım-Gerilim(I-V) karakteristikleri belirlendi.

3.1.2 Işık Şiddetinin Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması

Gözenekli Silisyumun (GS) hazırlanmasında 1×10^{-2} Ω.cm öz dirençli, [111] yönelimine sahip Antimon (Sb) katkılı n-tipi tek kristal silisyumlar kullanıldı. GS üretimi için kurulan düzeneklerde kullanılacak malzemeler hidroflorik (HF) asitine karşı kimyasal tepkime göstermemelidir. Bu yüzden elektrot olarak platin (Pt) kullanıldı. Pt katot olarak, n-tipi Si ise anot olarak seçildi ve uygun HF bazlı çözelti içerisine birbirine paralel olacak şekilde batırıldı. Elektrotlar arasında akım kaynağı yardımı ile uygun bir akım yoğunluğu elde edildi. Anodizasyon işlemi başlamadan önce; Si kristali sırasıyla etil alkol ve damıtık su ile temizlendi ve parlak yüzeyi ışık kaynağına doğru olacak şekilde düzeneğe yerleştirildi. Örnek ile ışık kaynağı arasındaki uzaklık değiştirilerek farklı gözenekli silisyum yapılar üretildi(Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.

Yapılan çalışmaların ilk evresinde;

- HF:dH₂O; 1:3 çözeltisi,
- 15 mA/ cm² akım yoğunluğu,
- n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm,
- ışık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası uzaklık 3-6-9-12-15-20-30 cm,
- anodizasyon süresi 55 dakika

parametreleri kullanılarak türdeş GS/Si yapılar elde edildi. Hazırlanan örneklerin açık devre geriliminin ve kısa devre akımının ışık şiddetinin değişimine bağlı ölçümleri yapıldı. Örneklerin Akım-Gerilim (I-V) karakteristikleri belirlendi.

3.1.3 Uygulanan Akım Yoğunluğunun Değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması

Bu aşamada uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek oluşan gözenekli silisyum yapılarıdaki değişiklikler gözlenmiştir.

- Anodizasyon süresi 55 dakika
- HF:dH₂O; 1:3 çözeltisi,
- n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm,
- Işık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası uzaklık 8 cm,
- 4, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 50 mA/ cm² akım yoğunluğu,

parametreleri kullanılarak homojen GS/Si yapılar elde edildi. Hazırlanan örneklerin açık devre geriliminin ve kapalı devre akımının zamana bağlı ölçümleri yapıldı. Örneklerin Akım-Gerilim(I-V) karakteristikleri belirlendi.

3.1.4 HF(Hidroflorik asit):dH₂O(distile su) oranının değiştirilmesi ile Gözenekli Silisyum Oluşması

Bu aşamada reaksiyonun oluşabilmesi için gerekli olan çözelti hazırlama oranları değiştirilerek oluşan gözenekli silisyum yapılarıdaki değişiklikler gözlenmiştir.

- Anodizasyon süresi 55 dakika
- 15 mA/ cm² akım yoğunluğu,
- n-tipi Si ile Pt elektrot arası uzaklık 1 cm,
- Işık kaynağı (50 W, 12 V halojen lamba) ile n-tipi Si arası uzaklık 8 cm,
- HF:dH₂O; 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 çözeltisi,

parametreleri kullanılarak homojen GS/Si yapılar elde edildi. Hazırlanan örneklerin açık devre geriliminin ve kapalı devre akımının zamana bağlı ölçümleri yapıldı. Örneklerin Akım-Gerilim(I-V) karakteristikleri belirlendi.

3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltiren elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme olanağı sunar. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur (Şekil 3.3). Bu çalışmada, GS-Si ve metal-GS-Si eklemler hazırlanıp SEM (Scanning Electron Microscopy) “JEOL/JSM-6335F” cihazı kullanılarak düşük vakumda üstten ve kesitten SEM analizleri yapıldı (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

3.3 Metal (Au) / GS Schottky Eklemlerin Eldesi

Hazırlanan GS/nSi altlıkların arka yüzeylerinde oluşan oksit tabaka zımparalandı ve üzerine iki nokta halinde direnç minimum olacak şekilde indiyum (In) kaplanarak kontak yapıldı. Bu işlemten sonra, silisyumun gözenekli yüzeyi elektron-demeti buharlaştırma tekniği ile vakum sisteminde Altın (Au) metali kaplandı (Şekil 3.4). Kaplanan metalin (Au) kalınlığı teorik olarak;

$$d = \frac{\Delta m}{2\pi h^2 \rho} \quad (3.1)$$

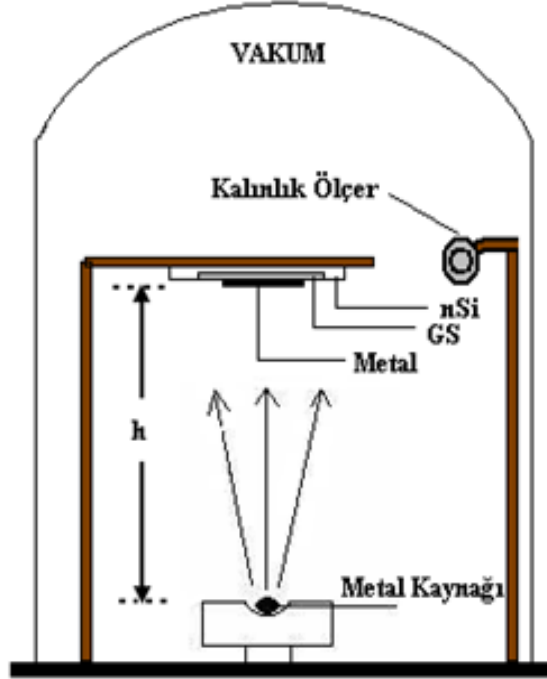
ifadesiyle hesaplandı.

Burada,

Δm : buharlaştırılan metalin kütlesi,

ρ : metalin yoğunluğu,

h : metal kaynağın GS filme olan uzaklığıdır.



Şekil 3.4 Vakumda GS/Si üzerine metal kaplanması şematik gösterimi.

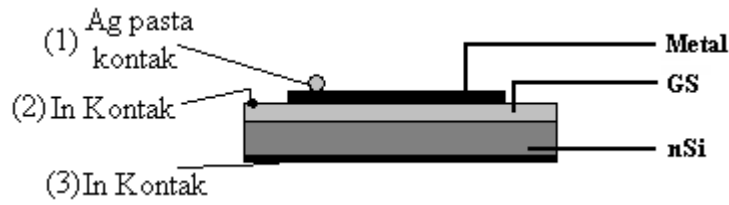
Bu işlem için Y.T.U Fizik Bölümü Katıhal Elektroniği laboratuvarındaki elektron demeti buharlaştırma vakum sistemi kullanıldı (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Y.T.Ü Fizik Bölümü Katıhal Elektroniği Laboratuvarında bulunan elektron demeti Buharlaştırma Vakum Sistemi

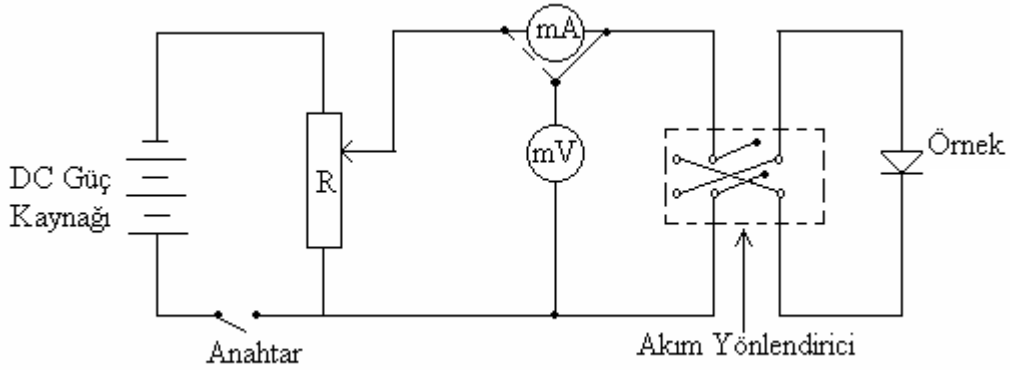
3.4 Metal/ GS Eklemlerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Ölçümü

Hazırlanan GS/nSi altlıklara In kontak yapıldı ve gözenekli silisyum kısmı elektron-demeti buharlaştırma tekniği ile vakum sisteminde Au metali ile kaplandı. Kaplanan metallerin üzerine gümüş kontak yapılarak bu kontaklardan elektriksel ölçümlerde yararlanıldı (Şekil 3.6). Bu elektriksel ölçümler sonucunda I-V karakteristikleri, farklı ortamlarda V_{OC} açık devre gerilimi I_{SC} kısa devre akımı belirlendi.



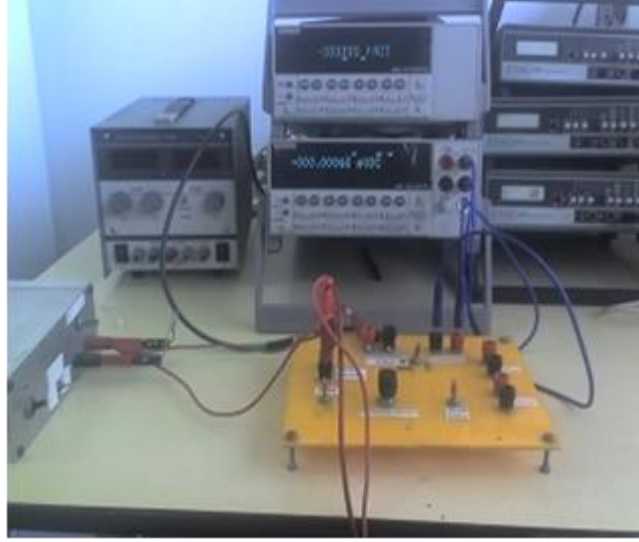
Şekil 3.6 Metal/GS/Si Schottky eklemi

GS/Si ve metal/GS/Si yapıların akım-gerilim karakteristikleri, havada, su gibi hidrojen içeren sıvılara daldırılarak oda sıcaklığında ölçüldü. Şekil 3.7'de akım-gerilim karakteristiklerinin ölçülmesinde kullanılan devrenin şeması görülmektedir.



Şekil 3.7 Örneklerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması

Deneylerimizi yaparken katihal elektroniği laboratuvarında kullanılan sistemin resmi Şekil 3.8' görülmektedir.



Şekil 3.8 Y.T.Ü Fizik Bölümü Katıhal Elektroniği Laboratuarında bulunan akım-gerilim karakteristiği ölçüm sistemi.

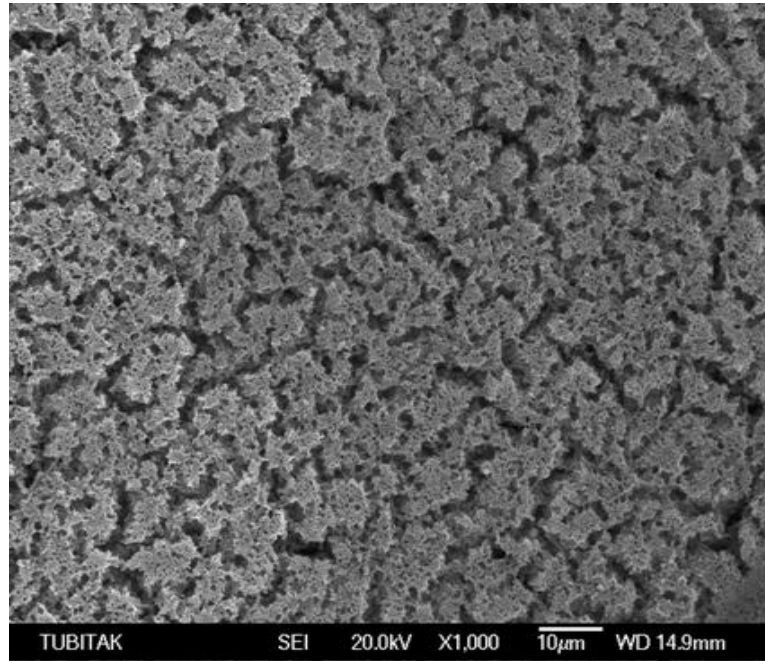
BÖLÜM 4

BULGULAR

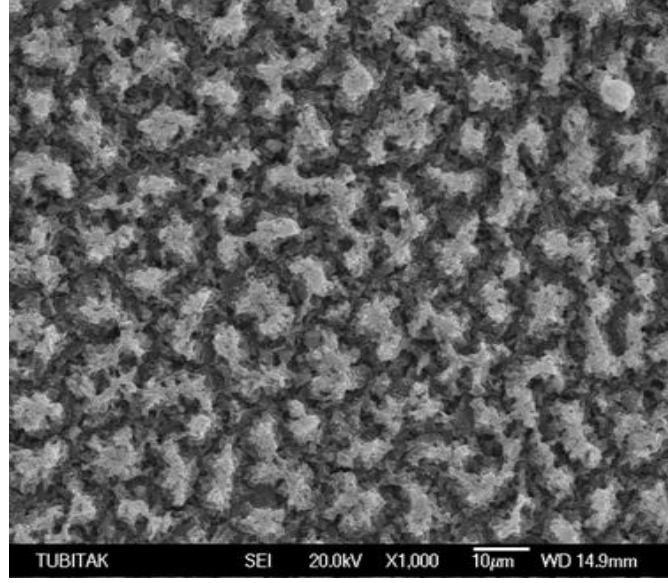
4.1 Işık Şiddetinin Etkisi

4.1.1 Işık Şiddetinin Değiştirilmesi ile Oluşan gözenekli Silisyum örneklerin SEM Analizleri

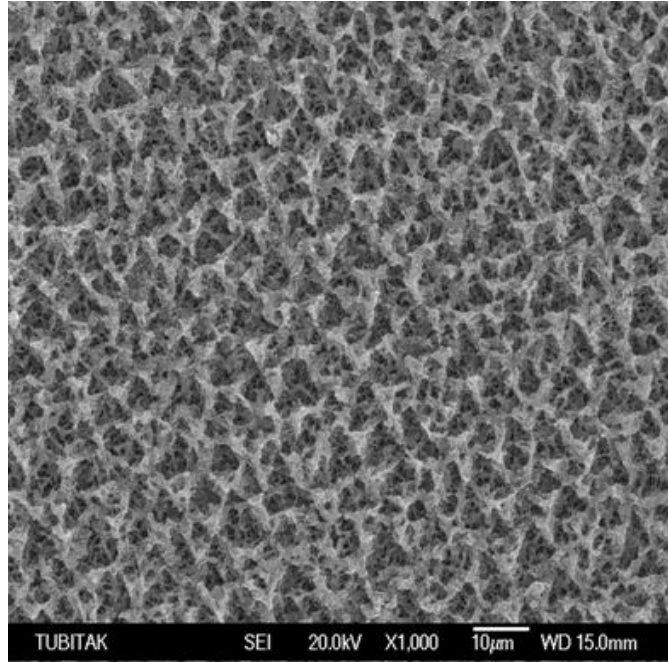
Farklı ışık şiddeti kullanılarak hazırlanan GS-Si örneklerin SEM fotoğrafları karşılaştırıldı.



Şekil 4.1. 2000 lüx ışık şiddeti (d=20cm)



Şekil 4.2 4000 l x  lık Şiddeti (d=15cm)



Şekil 4.3 6000 l x  lık Şiddeti (d=6cm)

SEM Analizinde ışık şiddetinin gözenek yapısını oldukça değiştirdiği gözlenmiştir. Işık şiddeti düşük olduğunda silisyum yüzeyinde dağlanma azdır ve gözeneklilik homojen değildir (Şekil 4.1).

Işık şiddeti arttırıldığında silisyum yüzeyindeki dağlamalar artmış ve gözenekler daha homojen hale gelmiştir(Şekil 4.2).

Işık şiddeti daha da arttırıldığında gözenekler büyümüş ve sayıları artmıştır(Şekil 4.3).

4.1.2 Işık Şiddeti Etkisinin Açık Devre Gerilimine Etkisi

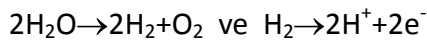
Farklı ışık şiddetleri ile hazırlanan GS-Si örnekler e-beam yöntemi ile Au metali ile 1500Å kalınlığında kaplanmıştır. Örneklerin Au metal kısmına Ag kontak, Si kısmına ise In kontak yapılmıştır. Bu iki kontak arasında oluşan açık devre gerilimleri incelenmiştir.

Au-GS-Si Yapıda Voc Oluşma Mekanizması

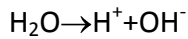
Au-GS-Si eklemının metal kısmı suya daldırıldığında eklemının iki kısmından alınmış kontaklar (bir kontak Au üzerinden, diğer kontak Si üzerinden) arasında bir potansiyel farkı oluşur bu bir açık devre gerilimidir ve devreden bir akım (kısadevre akımı) akar.

Metal/GS/Si eklemında su ortamında açık devre gerilimi oluşmasına sebep olan mekanizma şu şekilde açıklanabilir;

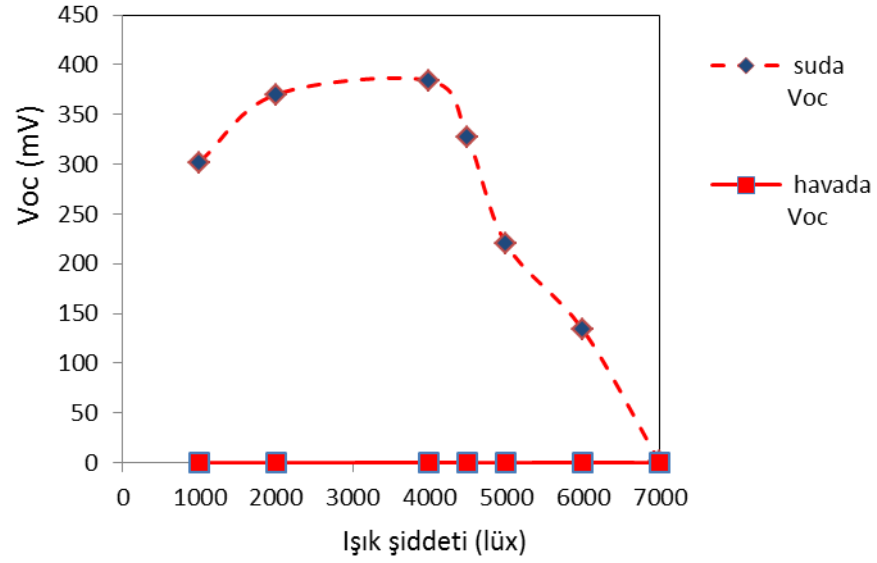
Katalizör rolünü oynayan metal film üzerine gelen su molekülleri (H₂O) metal filmde parçalanır.



Veya diğer bir reaksiyon da suyun proton (H⁺) ve OH⁻ iyonlarına ayrışmasıdır.



Her iki reaksiyonda da O₂ ve OH⁻ ye göre çok daha küçük boyutlu olan hidrojen iyonları metal filmde geçip Metal/GS eklemine ulaşır. Eklemine ulaşan hidrojen iyonları (protonları) donör gibi davranır, GS film boyunca protonların (H⁺) konsantrasyon gradyanını meydana getirerek sınır bölgesinde dipoller oluştururlar. Bu dipoller açık devre gerilimini meydana getirmektedirler.



Şekil 4.4 Açık Devre Gerilimi (Voc)(mV) - Işık Şiddeti (lüks) Grafiği

Şekil 4.4' de görüldüğü gibi ışık şiddetini en az olduğu örnekte açık devre gerilimi değeri düşüktür. Işık şiddeti arttıkça açık devre gerilimi artmıştır. Ancak ışık şiddeti çok yükseldiğinde değerlerde tekrar düşüş görülmüştür.

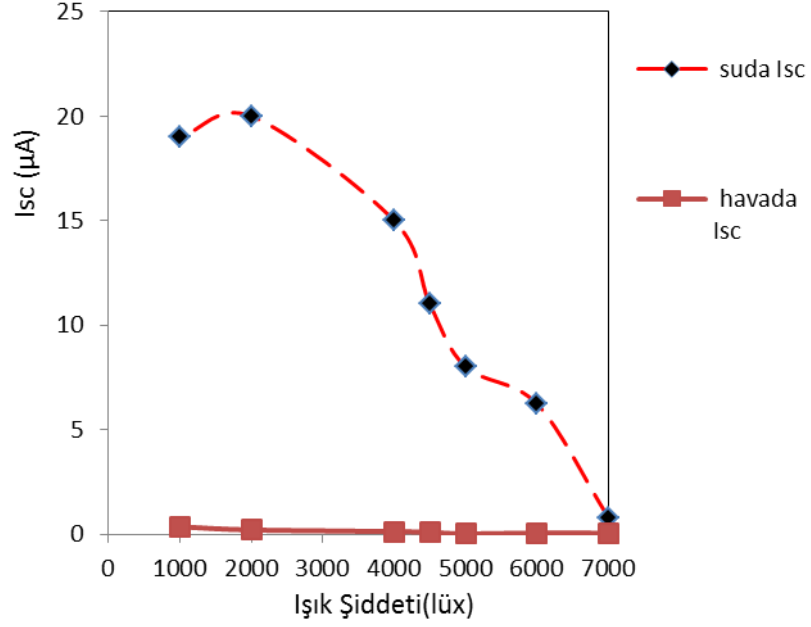
İdeal olan örnek ışık şiddetinin 4000 lüks(d=15cm) olduğu örnektir.

Voc' nin Işık Şiddeti ile Değişiminin Nedenleri

- 1) Işık şiddetinin az olduğu örnekte açık devre geriliminin değeri düşüktür. Bunun nedeni SEM analizinde de görüldüğü gibi (Şekil 4.1.a) gözeneklerin küçük olması ve homojen bir şekilde oluşmamasıdır. Mekanizmada anlatılan H⁺ iyonlarının oluşumu azdır.
- 2) Işık şiddeti arttıkça gözenekler büyümüş (Şekil 4.1.b) ve mekanizmada H⁺ iyon birikimi de artmıştır. Bu nedenle Voc değerleri de yükselmiştir.
- 3) Işık şiddeti arttıkça gözenekler daha da büyüdüğünden(Şekil 4.1.c) mekanizmadaki ayrışma işlemine gerek kalmaksızın büyük moleküller gözeneklerden geçmeye başladığından H⁺ iyon birikimi azalır. Bu nedenle Voc açık devre gerilimi diğerlerinde düşüş gözlenmiştir.

4.1.3 Işık Şiddeti Etkisinin Kısa Devre Akımına Etkisi

Işığın Au-GS-Si Hidrojen pilinin kısa devre akımına etkisi de incelenmiştir.



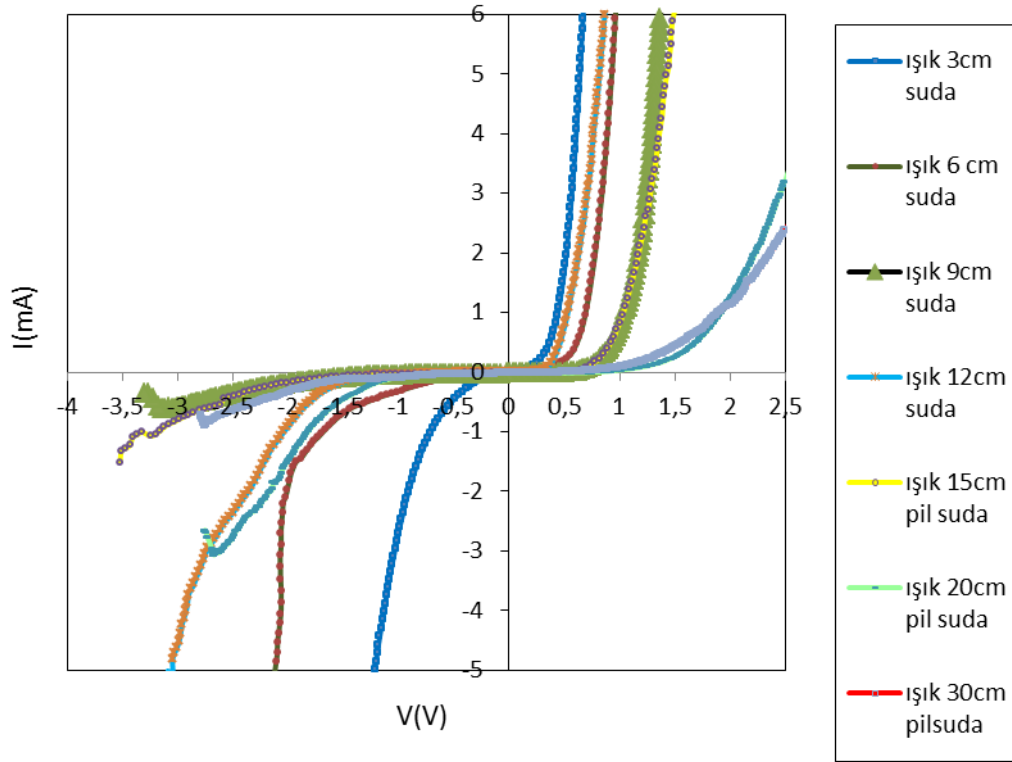
Şekil 4.5 Kısa Devre Akımı (I_{sc})- Işık Şiddeti (lux) Grafiği

Farklı ışık şiddetleri kullanılarak elde edilen örneklerin kısa devre akımı şekil 4.5' de görüldüğü gibi önce artmış, sonra azalmıştır. Bu değişikliğin nedeni Voc üzerindeki etkisi ile benzerdir.

Gözenekler büyüdüğünde H_2O 'daki hidrojenlerin H^+ iyonlarına dönüşme sayısı azalır. Bu da GS-Si ara yüzeyindeki dipollerin sayısını düşürür. Bu nedenle kısa devre akımında düşüş gözlenir.

4.1.4 Işık Şiddetinin Akım – Gerilim Karakteristiklerine Etkisi

Au-GS-Si Hidrojen Pili'nin, Au ve Si arasındaki kontaklar yardımıyla I-V karakteristikleri incelenmiştir.



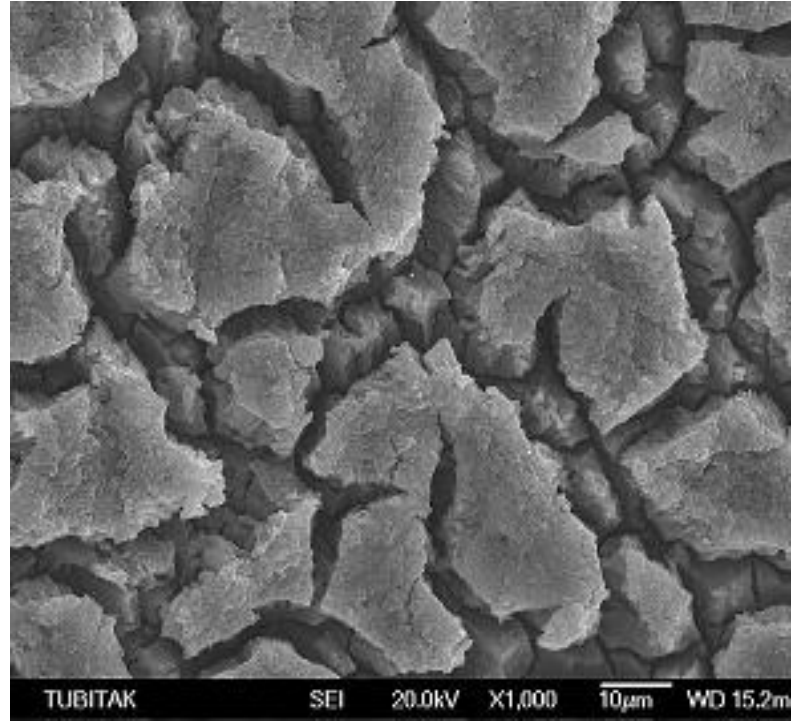
Şekil 4.6 Akım- Gerilim Eğrisi

Şekil 4.6' da görüldüğü gibi Au-GS-Si Hidrojen pilinin I-V karakteristiği tam olmasa da Shottky eklem özelliği gösterir. Doğru ve ters yöndeki keskin artışlar V_{oc} ve I_{sc} sonuçları ile paraleldir V_{oc} (Açık devre gerilimi) ve I_{sc} (Kısa devre akımı) grafiklerindeki yüksek değerler elde edilen ışık şiddetiyle üretilmiş örneklerin doğru ve ters yöndeki akım artışı daha fazladır. Bunun nedeni H^+ iyonlarının sayısının ideal gözeneklilikte olan örneklerde (4000 lüks ışık şiddeti örneğindeki gibi) daha fazla olması ve yük akışının daha kolay gerçekleşmesidir.

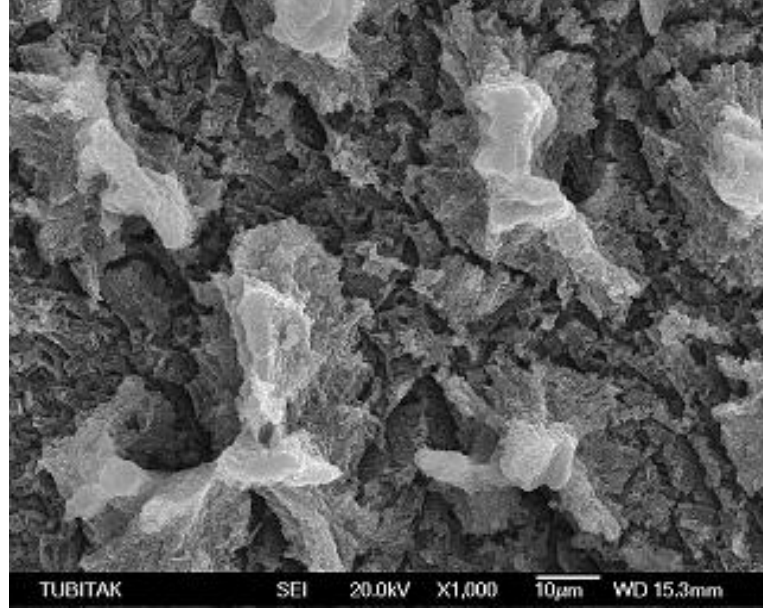
4.2 Akım Yoğunluğunun Etkisi

4.2.1 Akım Yoğunluğu Değiştirilerek Oluşturulan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi

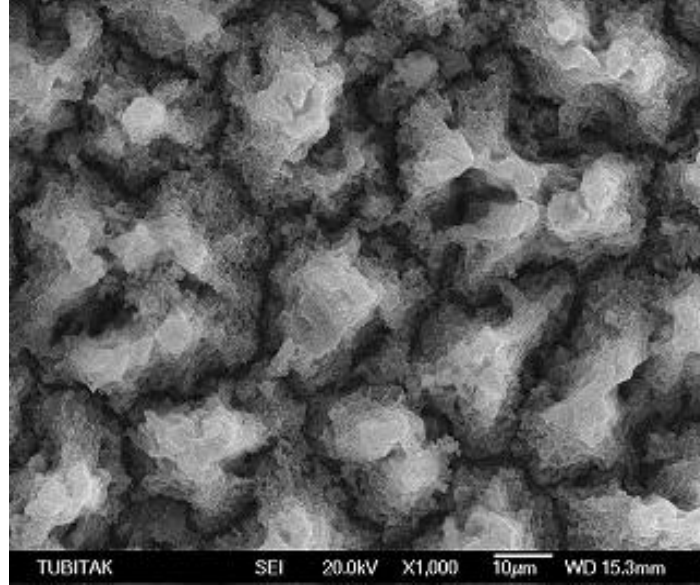
Farklı Akım Yoğunluğu kullanılarak hazırlanan GS-Si örneklerin SEM fotoğrafları karşılaştırıldı.



Şekil 4.7 Akım Yoğunluğu 8 mA/cm²



Şekil4.8 Akım Yoğunluğu 20 mA/cm²



Şekil 4.9 Akım Yoğunluğu 50mA/cm²,

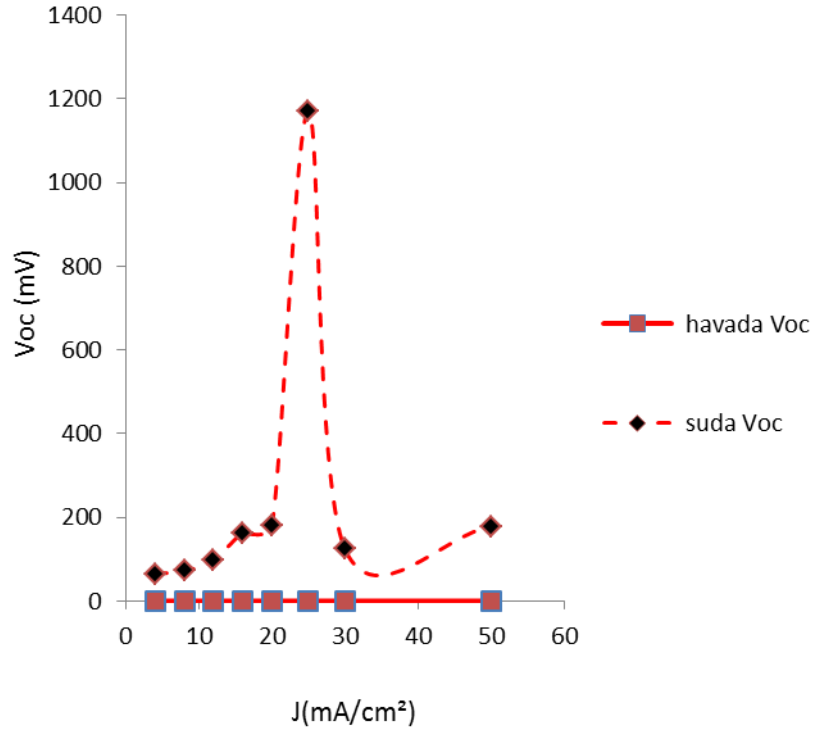
GS yapı silisyumun elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle belli bir akım yoğunluğunda asit ile dağlanmasıyla oluşturulur. Akım yoğunluklarını değiştirerek üretilen GS yapıların SEM analizinde değiştirilen bu parametrenin gözenekliliği oldukça etkilediği gözlenir. Sistemde uygulanan akım yoğunluğu tepkimeyi gerçekleştirebilecek kadar büyük değilse istenilen boyutta ve derinlikte GS oluşmaz. Oluşturulan GS örnekler kaplama yapmadan önce SEM fotoğraflarına bakarak grafiklerimiz için temel oluşturması sağlandı. Akım yoğunluğunu değiştirerek örneklerin ideal şartları belirlendi.

SEM fotoğraflarına bakıldığı zaman akım yoğunluğunun en düşük olduğu örnekte (Şekil 4.7) gözeneklerin daha yüzeysel ve yapının derinliğinin daha az olduğu görüldü.

Akım yoğunluğu arttırıldığı zaman ise (Şekil 4.8) gözenek boyutları ve derinliği artmıştır. Akım yoğunluğu çok fazla arttırıldığı zaman elektrokimyasal aşındırma sürecinde akım yoğunluğu değerinin tepkimede çok fazla etkili olduğu hatta örnekte aşırı tahribatlar yaptığı görüldü. Örneğin fazla dağlamaya uğradığı ve gözeneklerin yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmadığı gözlemlendi (Şekil 4.9). Bu durum mekanizmada H^+ iyon sayısının artmasına ve örneğin bozulmasına neden olmaktadır.

4.2.2 Akım Yoğunluğunun Açık Devre Gerilimine Etkisi

GS tek kristal silisyumdan elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle üretilir. Üretim aşamasında HF çözeltisi içerisindeki silisyum ışık şiddeti altında devreye akım yoğunluğu uygulayarak belli bir sürede oluşturulur. Oluşturulan örneklerin SEM analizi yapılmış ve SEM analizinde gözenekliliğin akım yoğunluğu ile arttığı gözlenmiştir. Akım yoğunluğu değiştirilerek oluşturulan GS örneklerin arka yüzeyi zımparalanarak In kontak alınmıştır. GS örnekler 1500 Å kalınlığında Au metali ile kaplanmıştır. Kaplanan örneklerin Au kısmından ise Ag kontak alınmıştır. Kontaklar arasında bir potansiyel fark oluşur bu bir açık devre gerilimidir. Oluşan açık devre geriliminin havada ve sudaki değerleri ölçülmüştür. Au-GS-Si eklemine su ortamında açık devre gerilimi oluşmasına sebep olan mekanizma bir önceki aşamada anlatıldığı gibidir.



Şekil 4.10 Açık devre gerilimi- Akım yoğunluğu grafiği

Akım yoğunluğunun en az olduğu örnekte gözeneklilik daha az olduğu için açık devre gerilimi değeri çok düşüktür. Çünkü gözeneklilik az olduğu zaman GS-Si ara yüzeyinde H⁺ iyonları birikmez. Devre gerilim üretmez. Akım yoğunluğu arttırıldıkça açık devre geriliminin arttığı gözlenmiştir. Açık devre gerilimi sistemde gözeneklilikle paraleldir.

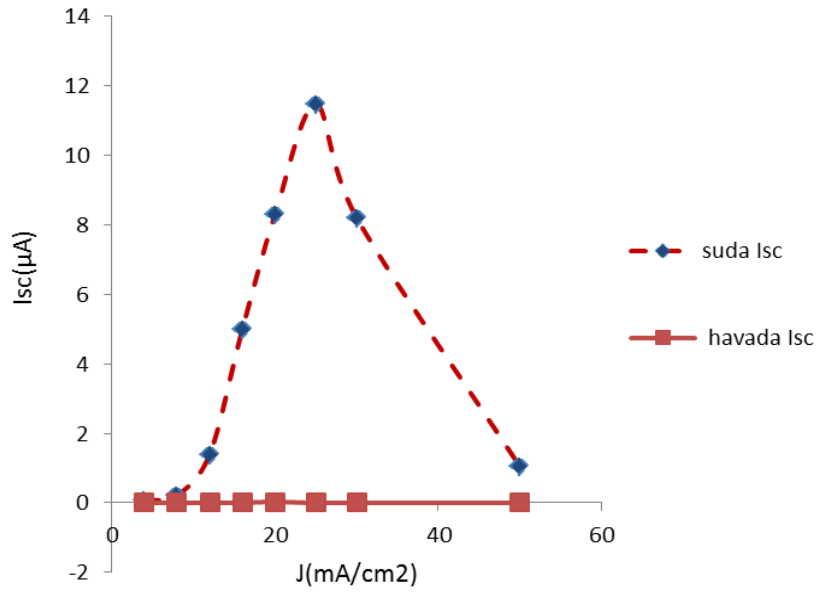
Gözeneklilik ideal boyutlarda ve derinlikte ise buna paralel olarak sistemde açık devre gerilimi de maksimum olacaktır.

Akım yoğunluğu belli bir değere kadar arttırıldığı zaman açık devre gerilimi artmaktadır. Daha sonra ise açık devre gerilimi değeri düşmüştür. Bu düşüşün nedeni ise yapının içerisindeki gözenekliliğin homojen bir şekilde dağılmamasıdır.

En ideal örnek akım yoğunluğunun 25 mA/cm^2 olduğu örnektir.

4.2.3 Akım Yoğunluğunun Kısa Devre Akımına Etkisi

Akım yoğunluğunun açık devre gerilimine etkisi incelenmesinden sonra bu çalışmada GS filmin akım yoğunluğunun kısa devre akımı üzerindeki etkisi de araştırıldı. GS filmler suya daldırıldığı zaman oluşan I_{sc} değeri ölçüldü.



Şekil 4.11 Kısa devre akımı- Akım yoğunluğu grafiği

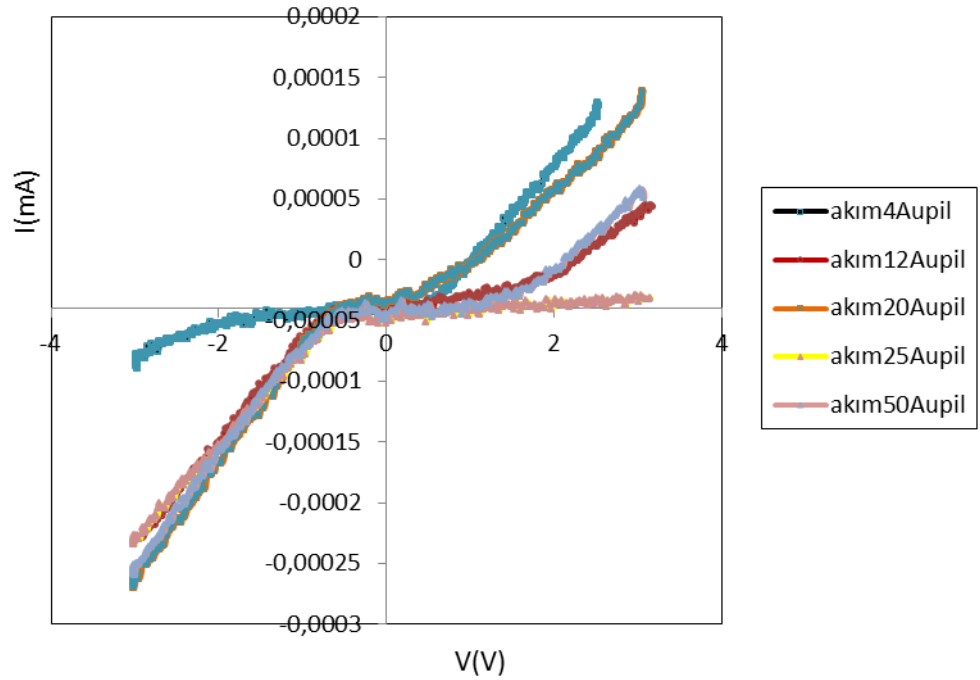
Akım yoğunluğu arttıkça açık devre gerilimindeki artışlara bağlı olarak kısa devre akımında da artış gözlenmiştir. Yine açık devre gerilimi ölçümlerindeki gibi kısa devre akımı belli değere kadar artmış, daha sonra azalmıştır. Bunun nedeni belli bir akım yoğunluğunda gözenekli yapının oluşmasıdır. Yapının gözenekliliği homojen bir şekilde dağılıp istenilen boyut ve derinlikte olduğu zaman kısa devre akımı maksimum düzeye ulaşmıştır. Akım yoğunluğu daha fazla arttırılır veya azaltılırsa yapı ideal olmaktan çıkar.

Oluşturulan en iyi Au-GS-Si yapının maksimum açık devre gerilimi ve kısa devre akımı yapması beklenir.

Yine açık devre gerilimine paralel olarak en ideal örnek $J=25\text{mA}/\text{cm}^2$ olan örnektir.

4.2.4 Akım Yoğunluğunun Akım- Gerilim Karakteristiklerine Etkisi

Au-GS eklemleri elde etmek için bölüm 3.5’de ifade edildiği gibi GS-Si yapının üzerine elektron beam yöntemiyle Au filmi buharlaştırıldı. Buharlaştırma sırasında çok hızlı olan Au atomları, GS filmin içine kadar yerleşerek Au-GS eklemleri oluştururlar. Au film kalınlığı giderek artar ve gözenekler tamamıyla Au film ile kaplanır. Bu kaplanan Au tabaka, küçük hidrojen atomlarının geçişinde zar rolünü oynar ve nem duyarlılığı göstermeyen GS tabaka neme duyarlı Au-GS ekleme dönüşür. Si ve GS yüzeylerine In kontağı, Au kaplı yüzeye ise Ag kontak yapılmıştır.



Şekil 4.12 Akım-Gerilim karakteristiği

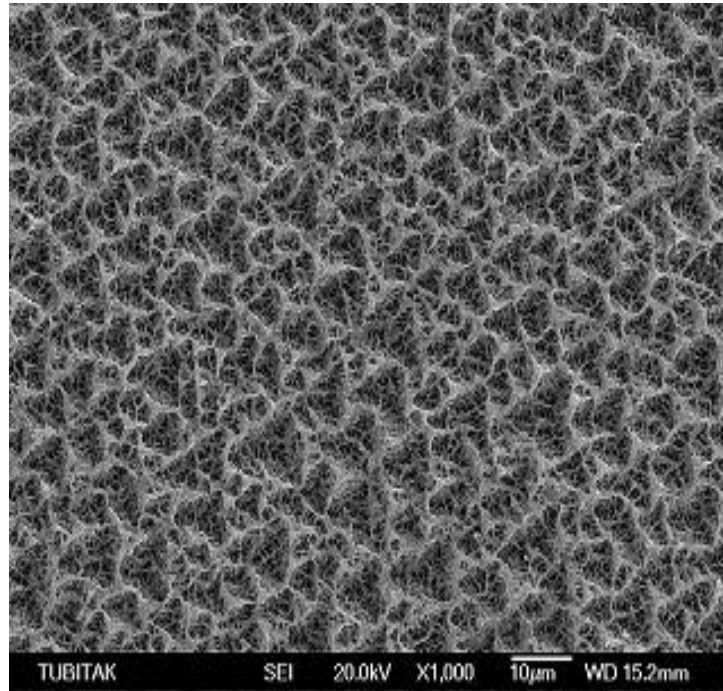
Au-GS ekleminin I-V karakteristikleri oda koşullarında ve su ortamında incelenmiştir(Şekil 4.12). Au-GS-Si eklemlerinin oda şartlarındaki I-V karakteristikleri tam olmasa da yaklaşık olarak Schottky eklem özelliği gösterir. Doğru yöndeki ve ters

yönde oluşan eğrilerin açık devre gerilimi ve kısa devre akımına paralel olarak artış ve azalış gösterdiği görülmektedir.

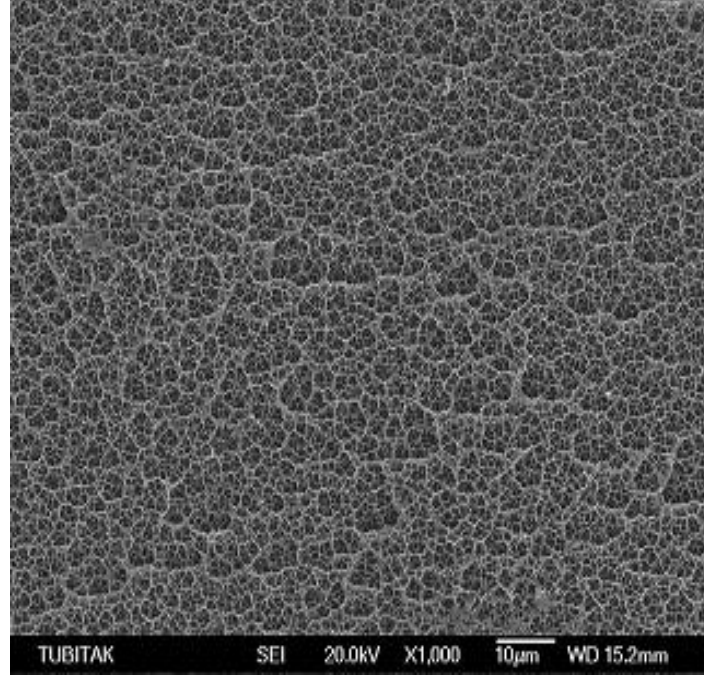
4.3 HF Konsantrasyon Değişiminin Etkisi

4.3.1 HF Konsantrasyonu Değiştirilerek Oluşturulan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi

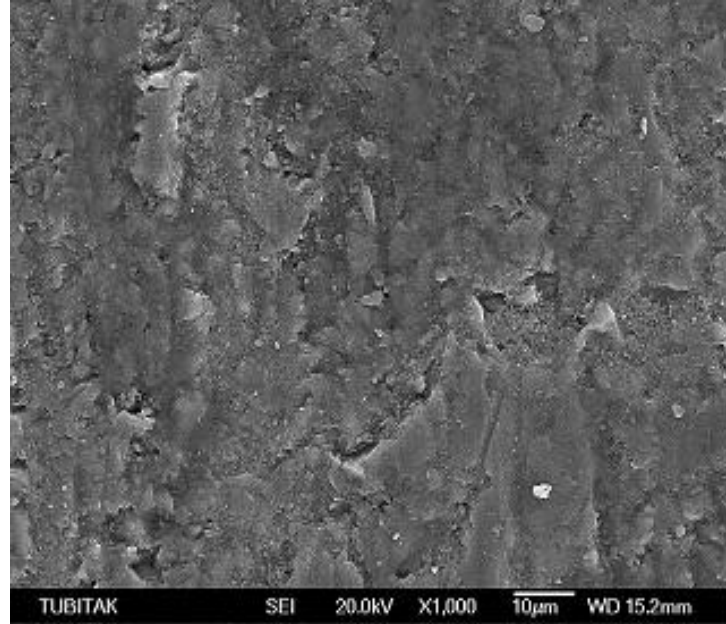
Elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle oluşturulan GS-Si yapının oluşabilmesi için HF içerisinde belli bir akım yoğunluğunda dağlanması gerekir. HF konsantrasyonu değiştirilerek oluşturulan bu yapıların SEM analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.13 HF:dH₂O çözeltisi karışım oranı 1:1



Şekil 4.14 HF:dH₂O çözeltisi karışım oranı 1:10



Şekil 4.15 HF:dH₂O çözeltisi karışım oranı 1:15

GS oluşum sürecinde HF:dH₂O oranı değiştirilmiştir. Böylece kullanılan çözelti derişik bir halden daha seyreltik bir hale getirilmiştir.

HF:dH₂O oranı 1:1 iken (şekil 4.13) dağlamaların çok fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni çözeltinin derişik çözelti olmasıdır. Çözeltide HF oranının fazla olmasıdır. Bu yüzden örnekler çok yoğun aside maruz kalmıştır ve dağlamalar artmıştır.

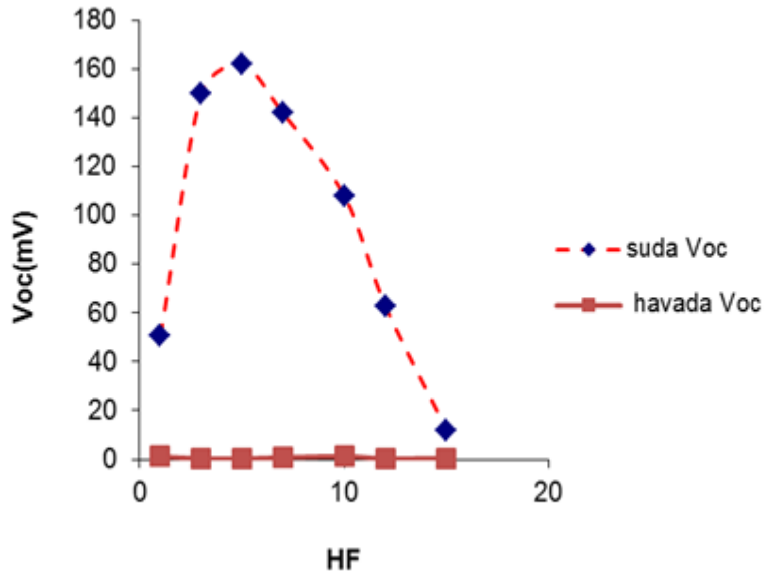
Çözelti içerisindeki HF konsantrasyonu arttırılıp çözelti daha seyreltik hale getirildiği zaman (şekil 4.14) gözeneklerin arttığı ve boyutlarının büyütülüp ideal boyuta geldiği grlmştir. Bunun nedeni ise asitin tam olarak örnekleri dağlayacak konsantrasyonda olmasıdır. Sonuç olarak gözenek boyutlarının ve derinliğinin istenilen ölçüde olduğu gözlenmiştir.

Çözeltide HF oranı arttıķķa (şekil 4.15) dağlamaların azaldığı neredeyse hiç gözeneklilik oluşmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni ise asitin derişikliğinin azalması hatta kimyasal reaksiyonda hiç etki gösterememesidir.

4.3.2 HF Konsantrasyonunun Açık Devre Gerilimine Etkisi

Au-GS-Si ekleminin metal kısmı suya daldırıldığında eklemin iki kısmından alınmış kontaklar (bir kontak Au üzerinden, diğer kontak Si üzerinden) arasında bir potansiyel fark oluşur, bu bir açık devre gerilimidir ve devreden bir akım (kısadevre akımı) akar. HF konsantrasyonu değiştirilerek üretilen GS-Si yapılarının Voc değişimi incelenmiştir.

Metal/GS/Si ekleminde, su ortamında açık devre gerilimi oluşmasına sebep olan mekanizma ışık şiddetinin etkisinde (Bölüm 4.1) anlatıldığı gibidir. Au-GS ekleminde Voc oluşturma mekanizması hidrojen iyonlarının (protonların) Au filminden Au-GS sınırına difüzyonu ile bağlı olduğundan, yapının gözenekliliğinin Voc ye etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.16 Açık devre akımı- HF konsantrasyonu değişim grafiği

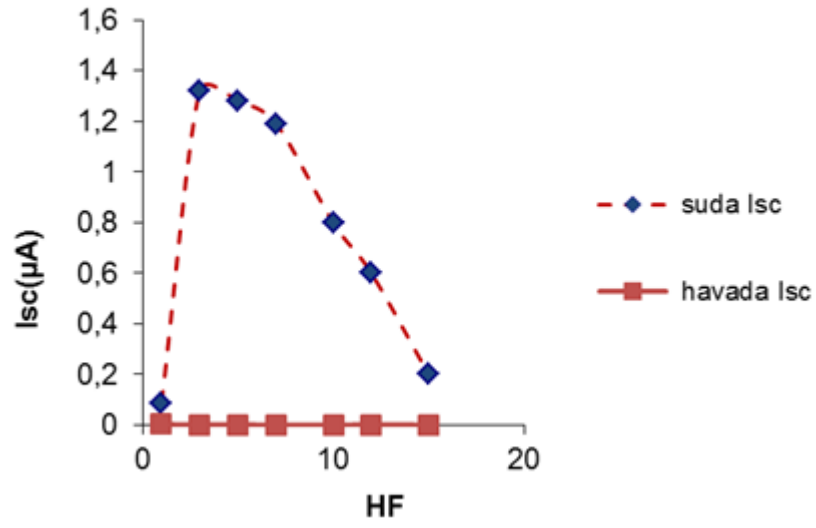
Şekil 4.16 HF konsantrasyonunun değiştirilmesinin Voc yi etkilediği görülmüştür. Hazırlanan çözeltinin derişik olduğu durumda (HF:dH₂O 1:1) Voc değerinin çok düşük olduğu fakat çözelti daha seyreltik hale getirilip çözelti içerisindeki HF oranı arttırıldığı zaman Voc de artışlar gözlenmiştir.

HF oranı daha fazla arttırılıp çözelti tamamen seyreltik hale getirildiği zaman Voc değerinin tümüyle düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni asit su ile karıştırıldığı zaman çözelti içerisinde dağlama özelliğini yitirmesidir.

HF oranı 1:3 olduğu durumda en ideal boyutta gözenekli silisyum oluşmuş ve buna paralel olarak açık devre gerilimi maksimum değere ulaşmıştır.

4.3.3HF Konsantrasyonunun Kısa Devre Akımına Etkisi

Au metalik film kalınlığının açık devre gerilimine etkisinin incelenmesinden sonra, bu çalışmada GS filmin Au metalik film kalınlığının da kısa devre akımı üzerinde etkisi de araştırıldı. Bunun için farklı konsantrasyonlara sahip HF çözeltisi kullanılarak GS-Si yapılar oluşturuldu ve oluşan eklemlerde I_{sc} ölçüldü (Şekil 4.17).

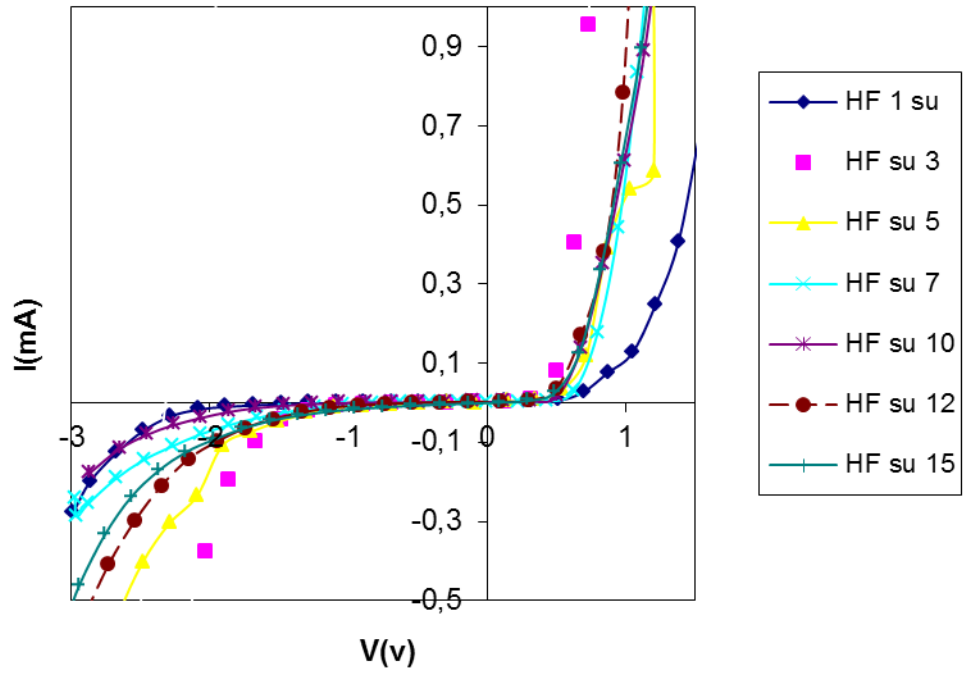


Şekil 4.17 Kısa devre akımı- HF konsantrasyonu değişim grafiği

HF konsantrasyonunun V_{oc} 'nin üzerindeki değişimine benzer bir değişim gözlenmektedir. Isc kısa devre akımındaki değerlerin değişiminin nedenleri yukarıda V_{oc} değerlerinin değişimdekilerle aynıdır.

4.3.4 Akım- Gerilim Karakteristikleri

Au-GS eklemleri elde etmek için bölüm 3.5 'de ifade edildiği gibi GS-Si yapının üzerine elektron beam yöntemiyle Au filmi buharlaştırıldı. Si ve GS yüzeylerine In kontağı, Ag kaplı yüzeye ise Ag kontak yapılmıştır. Ag-GS eklemine I-V karakteristikleri oda koşullarında ve su ortamında incelenmiştir. Ag-GS-Si eklemlerinin oda şartlarındaki I-V karakteristikleri tam olmasa da yaklaşık olarak Schottky eklem özelliği gösterir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Akım-Gerilim Karakteristiği

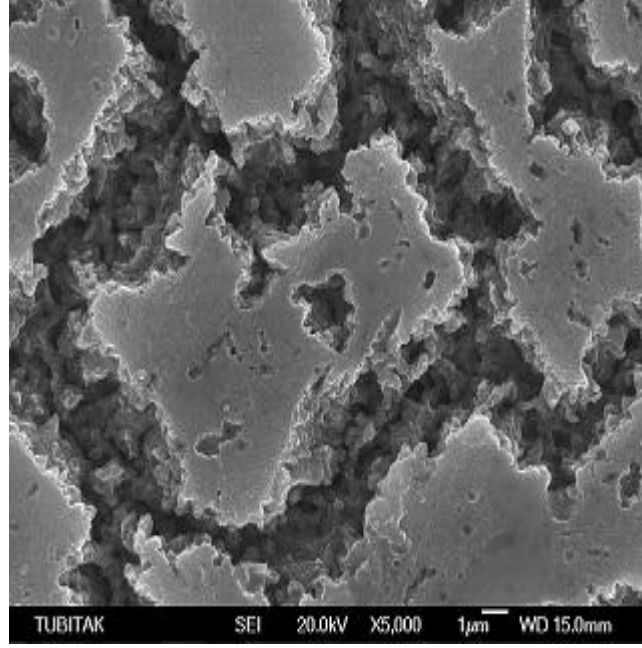
Akım- Gerilim karakteristiklerindeki doğru yöndeki ve ters yöndeki keskin artışlar V_{oc} ve I_{sc} grafikleri ile uyumludur.

Oluşturulan en ideal örnek HF:dH₂O 1:3 olan örnektir.

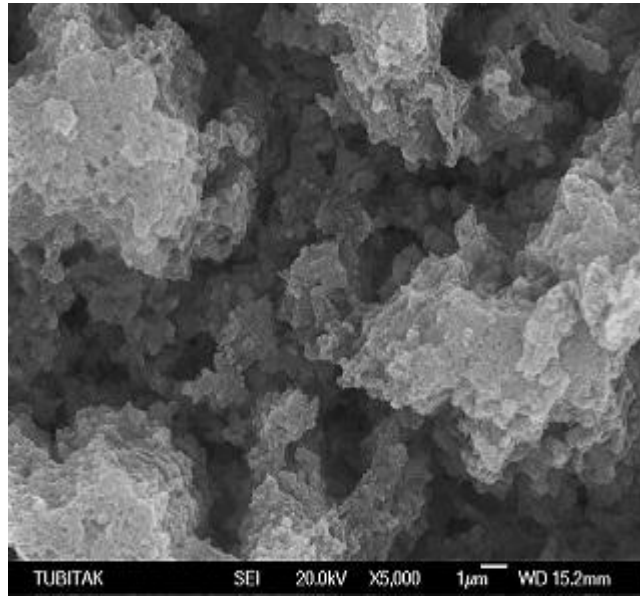
4.4 Anodizasyon Süresinin (Zamanın) Etkisi

4.4.1 Anodizasyon Süresi Değiştirilerek Oluşturulan Gözenekli Silisyum Örneklerin SEM Analizi

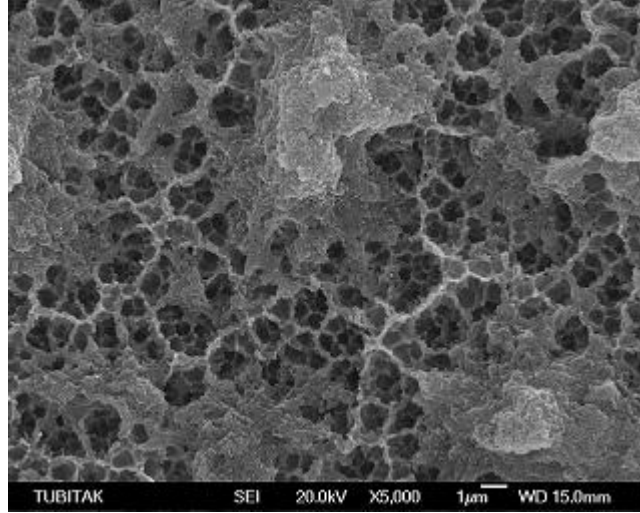
Elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle oluşturulan GS-Si yapının oluşabilmesi için anodizasyon süresinin belirlenmesi gerekir. Anodizasyon süresi değiştirilerek oluşturulan GS-Si yapıların SEM analizi yapılmıştır.



Şekil 4.19 10 dk lık örnek için SEM analizi



Şekil 4.20 40 dk lık örnek için SEM analizi



Şekil 4.21 70 dk lık örnek

SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi 10 dk lık örnekte zaman gözeneklilik oluşması için yeterli değildir. Örnekler sadece yüzeysel olarak dağlanmıştır. Bu yüzden gözenek boyutu küçük ve derinlikler oldukça azdır (Şekil 4.19).

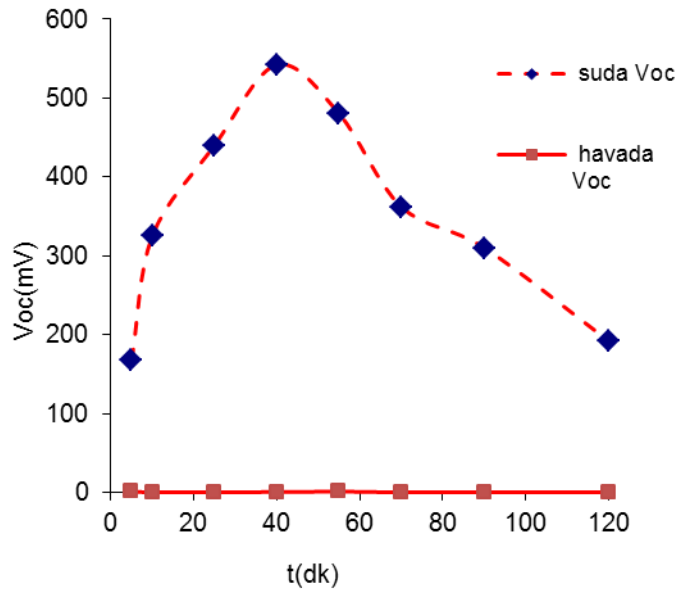
40 dk lık örnekte gözenek boyutunun ve derinliklerin maksimum olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.20). Bu örnekte zaman gözenek oluşturmak için yeterlidir. Geçen sürede atomlar arasındaki bağlar birbirinden koparak GS yapı oluşmuştur.

70 dk lık örnek çok fazla sürede dağlamaya maruz kaldığı için gözenekler çok dağınık biçimde oluşmuştur (Şekil 4.21).

4.4.2 Anodizasyon Zamanının Açık Devre Gerilimine Etkisi

Au-GS-Si eklemine metal kısmı suya daldırıldığında eklem iki kısımdan alınmış kontaklar (bir kontak Au üzerinden, öteki kontak Si üzerinden) arasında bir potansiyel fark oluşur bu bir açık devre gerilimidir ve devreden bir akım (kısadevreye akımı) akar. HF konsantrasyonu değiştirilerek üretilen GS-Si yapılarının Voc değişimi incelenmiştir.

Metal/GS/Si eklemine su ortamında açık devre gerilimi oluşmasına yol açan mekanizma ışık şiddetinin etkisinde (Bölüm 4.1) anlatıldığı gibidir. Au-GS eklemine Voc oluşturma mekanizması hidrojen iyonlarının (protonların) Au filminden Au-GS sınırına difüzyonu ile ilgili olduğundan, yapının gözenekliliğinin Voc ye etkisi incelenmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Açık devre gerilimi- Zaman(dk) grafiği

Anodizasyon zamanının değiştirilmesiyle Voc 'de değişiklik gözlenmiştir.

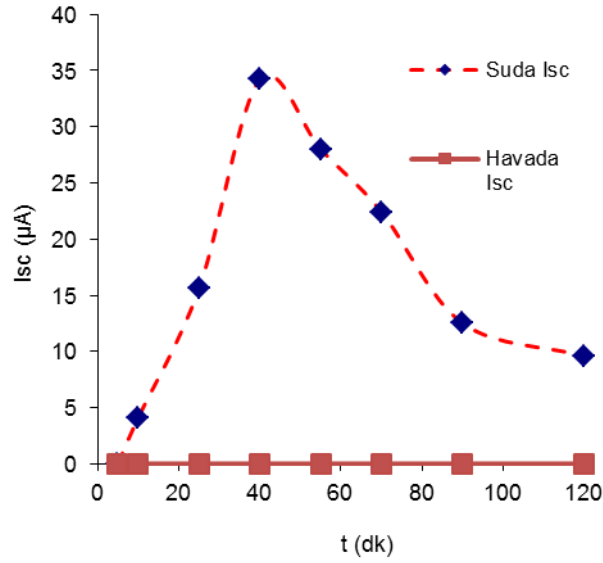
5 dk lık örnekte zaman GS-Si yapısının oluşması için yeterli olmamıştır. Gözeneklilik tam olarak oluşmadığı için açık devre gerilimi değeri çok düşüktür. Gözeneklilik oluşması için gerekli zaman arttırıldığında Voc nin belli bir değere kadar arttığı daha sonra düşüş gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeni zaman geçtikçe gözenekler yapı içerisine homojen bir şekilde yayılmış istenilen boyut ve derinlikte oluşmuştur. Zamanı çok fazla

arttırdığımız zaman örnek çok fazla süre dağlanmakta bu da örneğin yapısına zarar vermektedir.

40dk lık örnekte en ideal boyutta gözenekli silisyum oluşmuş ve buna paralel olarak açık devre gerilimi maksimum değere ulaşmıştır.

4.2.3 Anodizasyon Zamanının Kısa Devre Akımına Etkisi

Au metalik film kalınlığının açık devre gerilimine etkisi incelemesinden sonra, bu çalışmada GS filmin Au metalik film kalınlığının da kısa devre akımı üzerinde etkisi de araştırıldı. Bunun için anodizasyon zamanı değiştirilerek GS-Si yapılar oluşturuldu ve oluşan eklemlerde I_{sc} ölçüldü (Şekil 4.23).

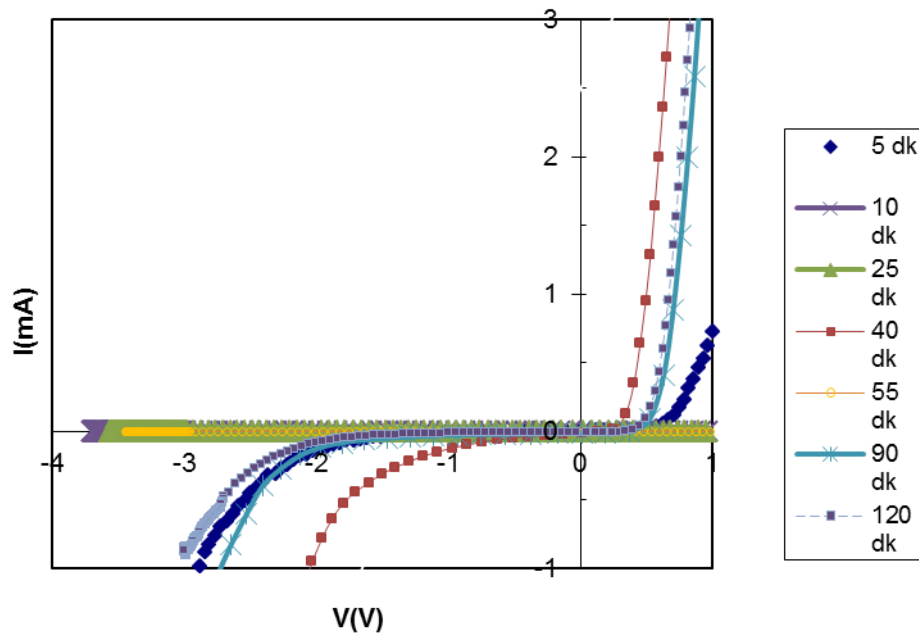


Şekil 4.23 Kısa devre akımı-Zaman grafiği

Anodizasyon zamanındaki artışa bağlı olarak kısa devre akımında da artış gözlenmiştir. Anodizasyon zamanının V_{oc} 'nin üzerindeki değişimine benzer bir değişim gözlenmektedir. I_{sc} kısa devre akımındaki değerlerin değişiminin nedenleri yukarıda V_{oc} değerlerinin değişimindekilerle aynıdır.

4.4.4 Akım- Gerilim Karakteristikleri

Au-GS eklemleri elde etmek için bölüm 3.5 'de ifade edildiği gibi GS-Si yapının üzerine elektron beam yöntemiyle Au filmi buharlaştırıldı. Si ve GS yüzeylerine In kontağı, Ag kaplı yüzeye ise Ag kontağı yapılmıştır. Ag-GS ekleminin I-V karakteristikleri oda şartlarında ve su ortamında incelenmiştir. Ag-GS-Si eklemlerinin oda şartlarındaki I-V karakteristikleri tam olmasa da yaklaşık olarak Schottky eklem özelliği gösterir (Şekil 4.18).



Şekil 4.23 Akım-Gerilim Karakteristiği

Akım- Gerilim karakteristiklerindeki doğru yöndeki ve ters yöndeki keskin artışlar V_{oc} ve I_{sc} grafikleri ile uyumludur.

Oluşturulan en ideal örnek anodizasyon zamanının 40 dk olduğu örnektir.

SONUÇLAR

- 1) Gözenekli silisyum 15 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu, 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm tutularak ve anodizasyon süresi 5-10-25-40-55-70-90-120 dakika olacak şekilde değiştirilerek üretilmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra Au-GS-Si kontağını oluşturmak için e-beam yöntemiyle Au metali ile kaplanmıştır. Kaplanan örneklerde Au metali üzerinden Ag kontak GS yapının arka kısmından In kontak alınmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturularak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte $V_{oc}=542\text{mV}$ $I_{sc}=34,2\mu\text{A}$ olarak belirlenmiştir. V_{oc} ve I_{sc} ölçümlerinden sonra örneklerin I-V karakteristikleri belirlenmiştir.
- 2) Gözenekli silisyum 15 mA/cm^2 lik akım yoğunluğu, 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, anodizasyon süresi 55 dk sabit tutularak, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 3-6-9-12-15-20-30 cm olacak şekilde değiştirilerek üretilmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra Au-GS-Si kontağını oluşturmak için e-beam yöntemiyle Au metali ile kaplanmıştır. Kaplanan örneklerde Au metali üzerinden Ag kontak GS yapının arka kısmından In kontak alınmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturularak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte $V_{oc}=385\text{mV}$ $I_{sc}=20\mu\text{A}$ olarak belirlenmiştir. V_{oc} ve I_{sc} ölçümlerinden sonra örneklerin I-V karakteristikleri belirlenmiştir.

- 3) Gözenekli silisyum 1:3 HF:dH₂O çözeltisi kullanılarak, anodizasyon süresi 55 dk, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm sabit tutularak, akım yoğunluğu 4, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 50 mA/ cm² olarak değiştirilerek oluşturulmuştur. Oluşan GS yapıların GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra Au-GS-Si kontağını oluşturmak için e-beam yöntemiyle Au metali ile kaplanmıştır. Kaplanan örneklerde Au metali üzerinden Ag kontak GS yapının arka kısmından In kontak alınmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=1170mV I_{sc}=11,46 µA olarak belirlenmiştir. Voc ve I_{sc} ölçümlerinden sonra örneklerin I-V karakteristikleri belirlenmiştir.
- 4) Gözenekli silisyum anodizasyon süresi 55 dk, ışık kaynağı ile Si arasındaki uzaklık 8 cm, akım yoğunluğu 15mA/ cm² sabit tutularak HF:dH₂O çözeltisi 1:3, 1:5, 1:7, 1:10, 1:12, 1:15 olarak değiştirilerek oluşturulmuştur. Oluşan GS yapıların GS örneklerin SEM analizleri yapılmıştır. Daha sonra Au-GS-Si kontağını oluşturmak için e-beam yöntemiyle Au metali ile kaplanmıştır. Kaplanan örneklerde Au metali üzerinden Ag kontak GS yapının arka kısmından In kontak alınmıştır. Alınan kontaklar arasında potansiyel fark oluşturarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçülmüştür. Bu şartlar altında ölçüm yapılan en ideal örnekte Voc=150mV I_{sc}=1,32 µA olarak belirlenmiştir. Voc ve I_{sc} ölçümlerinden sonra örneklerin I-V karakteristikleri belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Uhlir, A., (1956), "Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon", Bell System Tech. J., 35:333-347.
- [2] Lehmann, V. and Gösele, U., (1991). Porous Silicon Formation A Quantum Wire Effects, Appl. Phys. Lett., 58: 856-858.
- [3] Canham L., (1997), Properties of Porous Silicon, DERA, Malvern, UK.
- [4] Tsai, C., vd., (1991). Appl. Phys. Lett., 59:2815.
- [5] Yamana, M., Kashiwazaki, K., Kinoshita, A., Nakano, T., Yamamoto, M. ve Walton, C., (1990), J. Electrochem. Soc. 137 2925.
- [6] Dimitrov, D.B., (1995). "Current-Voltage Characteristics of Porous-Silicon Layers", Physical Review B, 51,3:1562-1566.
- [7] Taliencio, T., Dilhan, M. ve Massone, E., (1995), Thin Solid Films, 255: 310.
- [8] Dzhafarov, T.D. ve Can, B., (2001), "Hydrogen-Stimulated Changes of Properties of Silver-Porous Silicon Interfaces", Surface Science, 482:1141-1144.
- [9] Dzhafarov, T., Omur Can, B., Oruc, C. ve Allahverdiev, Z., (2002). "Hydrogen sensing characteristics of Cu-PS-Si structures", JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, S0022-3727(02)54393-X.
- [10] Dzhafarov, T.D., Çingir, E., Oruç, Ç. ve Aydın, S.(2002) , "Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Özellikleri"
- [11] Dzhafarov, T.D., Oruc C. ve Aydın, S., (2004). "Humidity-Voltaic Characteristics of Au-Porous Silicon Interfaces", J. Phys. D: Appl. Phys., 37, 3: 404-408.
- [12] Dzhafarov, T.D., Aydın, S. ve Oruc, C., "Effect of Porosity on Optical and Electrical Properties of Free Standing Porous Silicon", 9-th International Conference on The Formation of Semiconductor Interfaces, ICFSI-9, September 15-19, 2003, Madrid
- [13] Dzhafarov, T.D., Oruc, C., Guven, G., "Humidity-Voltaic Properties of Metal-Porous Silicon Contacts", 9-th International Conference on The Formation of Semiconductor Interfaces, ICFSI-9, September 15-19, 2003, Madrid.

- [14] Dzhaferov, T.D., Oruc, C., Aydin, S., Cingi, E. ve Oren, D., "Porous Silicon Based Hydrogen Detectors", International Conference Quantum Particles, Fields and Strings-2, QPFS-2, September 10-15, 2003, Baku.
- [15] Yonughwan Lee, Jonghyuck Lee, Yonggun Shul, Sangwoo Lim (2007) " Effect of wafer resistivity and HF concentration on the formation of vertically aligned porous silicon, Journal of Industrial and Engineering Chemistry,doi:10.1016/j.jiec.2007.07.004
- [16] M. Balarin, O. Gamulin, M. Ivanda , M. Kosovic', D. Ristic, M. Ristic, S. Music, K. Furic , D. Krilov a, J. Brnjas-Kraljevic (2008) "Structural, optical and electrical characterization of porous silicon prepared on thin silicon epitaxial layer", Journal of Molecular Structure, doi:10.1016/j.molstruc.2008.10.045
- [17] A.S. Mogoda, Y.H. Ahmad, W.A. Badawy (2010) "Characterization of stain etched p-type silicon in aqueous HF solutions containing HNO₃ or KMnO₄",Materials Chemistry and Physics, doi:10.1016/j.jiec.2007.07.004
- [18] Bomin Cho, Sunghoon Jin, Bo-Yeon Lee, Minwoo Hwang, Hee-Cheol Kim, Honglae Sohn,(2011) "Investigation of photoluminescence efficiency of n-type porous silicon by controlling of etching times and applied current densities",Microelectronic Engineering, doi:10.1016/j.mee.2011.03.145
- [19] Caferov, T., (1998). Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- [20] Aydın, S., (2003), Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul
- [21] Lus, O.Ç., (2004). Metal (Cu, Au) Gözenekli Silisyum Eklemlerin Elektriksel Özellikleri, Doktora Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.
- [22] Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., (1997), "Porous Silicon: From Luminescence to LEDs", Physics Today. 50(1): 24-31"
- [23] Ömür, B.C., (1999), Gözenekli Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri, Doktora Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul
- [24] Karabay, I., (2010,Güz). Yarıiletkenler Fiziği Ders Notları, Y.T.Ü., İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Emine Esra AĞCABAY
Doğum Tarihi ve Yeri :4/11/1987-KARABÜK
Yabancı Dili :İNGİLİZCE
E-posta :esraasci@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	FİZİK	Yıldız Teknik Üniversitesi	-
Lisans	FİZİK	S.D.Ü	2009
Lise		Demir Çelik Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2005

YAYINLARI

Bildiri

1. Esra Aşçı,S.Yıldırım, Ç.Oruç Luş “Anodizasyon koşullarından ışığın Ag-GS-Si Hidrojen Pili Parametrelerine Etkisi”, Türk Fizik Derneği 28. Uluslararası Fizik Kongresi 6-9 Eylül 2011 Bodrum-TÜRKİYE
2. S. Yıldırım,Esra Aşçı, Ç.Oruç Luş, “Ag Metali ve Metal Kalınlığının Gözenekli Silisyum Esaslı Hidrojen Pili Parametrelerine Etkisi”, Türk Fizik Derneği 28. Uluslararası Fizik Kongresi 6-9 Eylül 2011 Bodrum-TÜRKİYE
3. C.O.Lus, E.E.Asci , S.Yildirim , "Effect of Anadization Conditions on Metal-Porous Silicon Direct Hydrogen Fuel Cell", Materials Science & Technology 2010 (Clean Energy : Fuel Cells , Batteries , Renewables – Materials , Processing, and Manufacturing) 17-21 October Texas,ABD.