

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

139661

GÖZENEKLİ SİLİSYUM FİLMLERİN OPTİK
ÖZELLİKLERİ

Fizikçi Süreyya AYDIN

F.B.E.Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tayyar CAFEROV (Y.T.Ü)

İSTANBUL, 2003

TEZ YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
KURULUŞ BAKANLIĞI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1 Gözenekli Silisyum	2
2.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik ve Lüminesans Özellikleri.....	4
2.3 Silisyumun Elektriksel ve Yapısal Özellikleri	14
2.4 Direkt ve İndirekt Yarıiletkenlerin Band Diyagramları	18
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1 Gözenekli Silisyum/Silisyum Yapıların ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Elde Edilmesi	21
3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi	22
3.2.1 Gözeneklilik ve Kalınlık	22
3.2.2 Gözenekli Silisyum/Silisyum Yapıların SEM Analizi	22
3.3 Tek Kristal Silisyum ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Ölçümleri.....	22
3.4 Tek Kristal Silisyum ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Ölçümleri	26
3.4.1 Omik Kontakların Hazırlanması	26
3.4.2 Van der Pauw Yöntemi ile Öz direnç Ölçümleri	28
3.4.3 Yük Taşıyıcı Konsantrasyon Ölçümleri.....	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	34
4.1 Tek Kristal Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri	34
4.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin SEM Analizleri	35
4.3 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumları	37
4.3.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarının Gözenekliliğe Bağlılığı	37
4.3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarının Nemle Değişimi	40
4.3.3 Tavlamanın Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarına Etkisi	44

4.4	Gözenekli Silisyum Filmlerin Fotolüminesans Spektrumları.....	46
4.5	Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özellikleri.....	47
4.5.1	Gözenekli Silisyum Filmlerin Özdirencinin Gözenekliliğe Bağlı Değişimi	47
4.5.2	Gözenekli Silisyum Filmlerin Özdirencinin Nemliliğe Bağlı Değişimi.....	47
4.6	Anodizasyon Şartlarının Gözenekli Silisyum Filmlerin Kalınlık ve Gözenekliliğine Etkisi.....	49
5.	SONUÇLAR.....	52
KAYNAKLAR		55
ÖZGEÇMİŞ		57



SİMGE LİSTESİ

A	Alan
b, d	Kalınlık
B	Magnetik Alan
D	Difüzyon Katsayısı
e	Elektronun Yüğü
E	Aydınlanma
E _a	Akseptör Enerji Seviyesi
E _d	Donor Enerji Seviyesi
E _g	Yarıiletkenin Yasak Band Genişliğı
E _H	Hidrojenin İyonlaşma Enerjisi, Hall Alanının şiddeti
$\vec{F}$	Kuvvet
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
P	Gözeneklilik
q	Yük
R	Yansıma Katsayısı, Direnç
R _H	Hall Sabiti
t	Zaman
T	Optik Geçirgenlik, Mutlak Sıcaklık
$\vec{g}$	Hız
V	Gerilim
V _H	Hall Gerilimi
$\omega_{x,y,z}$	Kristal Boyutları
α	Soğurma Katsayısı
ϵ	Dielektrik sabiti
λ	Dalga Boyu
ρ	Özdirenç
μ	Mobilite
σ	İletkenlik
ν	Frekans

KISALTMA LİSTESİ

FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GS	Gözenekli Silisyum
RH	Relative Humidity
SEM	Scanning Electron Microscope
TEM	Transmission Electron Microscope
UV	Ultraviolet



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	GS' un SEM fotoğrafı (Bisi vd., 2000).	2
Şekil 2.2	GS oluşum mekanizması (Lehmann ve Gösele, 1991).	3
Şekil 2.3	GS'un farklı sıcaklıklarda 5 dk' lık termal uygulamalar sonrası fotoluminesans spektrumları (a) oda sıcaklığı, (b) 300 °C, (c) 350 °C, (d) 400 °C, (e) 450 °C [Tsai vd., 1991).	5
Şekil 2.4	Tek boyutlu yarıiletken kuantum kuyusunun şematik gösterimi (Collins vd., 1997).	7
Şekil 2.5	20 °C ile 900 °C arasında tavlama etkisiyle GS'da hidrojenin değişimi (Joshi, 1995).	8
Şekil 2.6	Aşındırma süresince atomik bağ konfigrasyonu (a) Si (100) yüzeyi, (b) Si (110) yüzeyi, (c) Si (111) yüzeyi (Kimura vd., 2001).	9
Şekil 2.7	Farklı gözeneklilikli GS filmlerin(d=40µm), 300 K' de geçirgenlik-enerji spektrumları (a)p-tipi Si ($\rho=1\Omega\text{cm}$), (b) p ⁺ -tipi Si ($\rho=10^{-2}\Omega\text{cm}$) (Sagnes vd., 1993).	11
Şekil 2.8	Farklı gözenekliliğe sahip GS filmler için optik transmisyonun foton enerjisine bağlı değişimi (A) %41, (B) %64, (C) %73, (D) %79, (E) %89, (F) %94 gözenekli (Xu vd., 1999).	11
Şekil 2.9	Farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin geçirgenliğinin foton enerjisiyle değişimi (A) %58, (B) %72, (C) %81 ve (D) %87 (Xu vd., 2000).	12
Şekil 2.10	% 75 gözenekliliğe sahip GS filmin geçirgenliğinin foton enerjisiyle değişimi (a) ısıtıl işlem öncesi (b) 200 °C de 40 saat oksidasyon sonrası, (c) 200 °C de 200 saat oksidasyon sonrası (Xu vd., 2000).	13
Şekil 2.11	Silisyumun band yapısı.	15
Şekil 2.12	Silisyumun atom yapısı.	15
Şekil 2.13	Silisyum kristalinin yapısı.	15
Şekil 2.14	(a) Sb atom yapısı, (b) Sb katkılı n-tipi Si atom yapısı, (c) n-tipi yarıiletkenlerin band yapısı.	17
Şekil 2.15	(a) Bor' un atom yapısı, (b) Bor katkılı n-tipi Si atom yapısı, (c) p-tipi yarıiletkenlerin band yapısı.	18
Şekil 2.16	Yarıiletken malzeme için temel soğurma spekturumu.	19
Şekil 2.17	(a) Direkt, (b) İndirekt yarıiletkende yasak band aralığı yakınındaki band yapısının gösterimi (Collins vd., 1997).	19
Şekil 3.1	Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.	21
Şekil 3.2	Optik ölçüm şeması.	23
Şekil 3.3	Nem Hücresi.	25
Şekil 3.4	GS filmlerin yüzeylere In kaplamak için kullanılan vakum sisitemi.	26
Şekil 3.5	(a) Gözeneklere paralel yönde direnç ölçümü için hazırlanan GS filmlerin şematik çizimi, (b) Gözeneklere dik yönde direnç ölçümü için hazırlanan GS filmlerin şematik çizimi.	27
Şekil 3.6	GS filmlerin direnç ölçümlerinde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.	28
Şekil 3.7	Van der Pauw yöntemi kontak yerleşim gösterimi (Caferov, 1998).	28
Şekil 3.8	f(R ₁ /R ₂) düzelme fonksiyonu grafiği (Caferov, 1998).	29
Şekil 3.9	Van der Pauw yönteminde öz direnç ölçümünde kullanılan örneklerin geometrik formları (Caferov, 1998).	29
Şekil 3.10	Manyetik alandaki (B) pozitif yüklü parçacığın hızını v ve Lorentz kuvvetinin FL yönlerinin gösterimi (Caferov, 1998).	30
Şekil 3.11	(a) p-tipi ve (b) n-tipi yarıiletkende Hall olayı (Caferov, 1998).	31
Şekil 4.1	Tek kristal silisyumun soğurma katsayısının enerjisiyle değişim grafiği.	34

Şekil 4.2	% 78 gözenekli GS/Si yapının üstten görünüm SEM resimleri.	35
	(a) 350, (b) 1000 kat büyütmede.	35
Şekil 4.3	% 78 gözenekli GS/Si yapının yandan görünüm SEM resimleri.	36
	(a) 2000, (b) 3500 kat büyütmede.	36
Şekil 4.4	(a) Oda şartlarında farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin soğurma katsayılarının foton enerjisiyle değişimi, (1) P= %25, (2) P= %46, (300 K, %40 RH).	38
Şekil 4.4	(b) Oda şartlarında farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin soğurma katsayılarının foton enerjisiyle değişimi, (3) P= %67, (4) P= %80, (300 K, %40 RH).	39
Şekil 4.5	GS filmlerin yasak band genişliğinin filmlerin gözenekliliğine bağlı olarak değişimi (%40 RH).	40
Şekil 4.6	GS filmin optik soğurma spektrumunun neme bağlı değişimi, (1) %40 RH, (2) %90 RH.	41
Şekil 4.7	GS filmlerin yasak band genişliğinin neme bağlı değişimi (P= %68).	41
Şekil 4.8	%90 nemde t=0-20 dk ve devamında t=20-40 dk nem ortamından çıkarıldığında GS filmlerin yasak band genişliğinin zamana bağlı değişimi.	43
Şekil 4.9	GS filmlerin (P= %69) yasak band genişliğinin hava ortamında tavlama zamanına bağlı değişimi (T=100°C).	45
Şekil 4.10	GS filmlerin (P= %75) yasak band genişliğinin vakumda tavlama zamanına bağlı değişimi (T=100°C).	45
Şekil 4.11	GS filmin fotoluminesans spektrumlarının sıcaklıkla değişimi.	46
Şekil 4.12	GS filmlerinin öz direncin gözeneklilikle değişimi, (%40 RH): (1) Gözeneklere dik yönde ($\rho_{\perp}$), (2) Gözeneklere paralel yönde ($\rho_{\parallel}$).	48
Şekil 4.13	GS filmin (P=% 64) öz direncinin değişimi: (1) nem ortamına (% 90 RH) yerleştirildiğinde (t= 0-10 dk), (2) nem ortamından çıkarıldığında (t= 12-20 dk).	48
Şekil 4.14	GS filmlerin gözenekliliklerinin anodizasyon süreci akım yoğunluğuna bağlı değişimi.	50
Şekil 4.15	GS filmlerin kalınlığının anodizasyon süreci akım yoğunluğuna bağlı değişimi.	50
Şekil 4.16	GS filmlerin gözenekliliğinin anodizasyon süreci aydınlanma ile değişimi.	51
Şekil 4.17	GS filmlerin kalınlığının anodizasyon süreci aydınlanma ile değişimi.	51

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri.....	14
--	----



ÖNSÖZ

Bitirme teziminin hazırlanmasında ve “bilimsel çalışma nasıl yapılır?” sorusuna aradığım cevabı vermemde bana yardımcı, destek ve en önemlisi örnek olan, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren hocam Sayın Prof.Dr. Tayyar CAFEROV’a teşekkür etmeyi bir borç bilir, minnettarlığımı meslek ve özel hayatımda kendisinin yetiştirdiği bir öğrenciye, bir insana yakışır biçimde davranacağıma söz vererek göstermek isterim.

Hocalarım, Fizik Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Emel ÇINGİ ve Fen Edebiyat Fakültesi Dekanı Sayın Prof.Dr. E. Durul ÖREN’e bilgi, tecrübe aktarımları ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi varlıklarını her an hissettiğim aileme bana verdikleri emekleri için,

Arkadaşım Barış YÜKSEL’e bana verdiği maddi, manevi desteklerden dolayı,

Deneysel çalışmalarına ilk başladığım günden itibaren yanımda olan ve kendisiyle çalışmaktan büyük zevk duyduğum sevgili arkadaşım Arş.Gör. Çiğdem ORUÇ LUŞ’a, tecrübelerini benimle paylaştığı için,

Diğer grup arkadaşlarım; Arş.Gör. Serkis Yeşilkaya, Arş.Gör. Murat Çalışkan, Arş.Gör. Fatih Ongül, Arş.Gör. Nimet Yılmaz ve oda arkadaşım Arş.Gör. Altan Bozdoğan’ a değerli varlıklarıyla beni motive ettikleri için, Yrd.Doç.Dr. Birsal Can Ömür’e birikimlerini benimle paylaştığı için,

ÇOK TEŞEKKÜR EDERİM.

Arş. Gör. Süreyya AYDIN

Şubat, 2004

ÖZET

Oda sıcaklığında gözenekli silisyumun (GS) görünür elektrolüminesans ve fotolüminesansından dolayı, bu materyal epeyce dikkat çekmiştir. GS'un yapısı ortalama 2-50 nm çap ve son derece geniş yüzey alanı ile karakterize edilmektedir ($\sim 10^3 \text{ m}^2\text{cm}^{-3}$). Yüzey bağları, özellikle Si-H ve Si-O, GS' nin elektriksel, optik ve gaz sensörü özelliklerinin değişiminde önemli rol oynarlar. İnce GS filmin optik ve elektriksel özellikleri nadiren göz önünde tutulmaktadır.

Bu çalışmada, ince GS filmlerin gözenekliliklerinin optik spektrumları ve elektriksel özelliklerine etkisi ele alınmıştır. Ayrıca, GS filmlerin soğurma spektrumunun nem ortamında ve tavlama ile değişimi incelemelerini içermektedir. Ayrıca, anodizasyon süreci aydınlanma ve akım yoğunluğu değişiminin gözeneklilik ve kalınlığa etkisi incelendi.

GS filmler n-tipi Si altlıklar üzerinde anodik asitle aşındırma yöntemi kullanılarak hazırlandı. GS ince film elektriksel parlatma yöntemiyle Si altlıktan ayrıldı. GS ince filmlerin kalınlıkları 5-15 μm ve gözeneklilikleri % (20-95) olarak belirlendi.

Bu araştırmanın temel sonuçları;

- (a) Normal oda şartlarında ($T=300 \text{ K}$, %40 RH) gözeneklilikteki artış (30%-90%) ile hem enerji band genişliğinin (1.4-1.9 eV) hem de öz dirençte artış (2×10^4 - $4 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$) gözlenmiştir.
- (b) Filmlerin gözeneklere dik yönde ölçülen öz dirençleri gözeneklere paralel doğrultudakinden yaklaşık iki kat büyüktür,
- (c) 55-95 %RH aralığındaki nem ortamlarında sabit gözeneklilikteki filmlerin yasak band genişliği 1.6 eV dan 1.8 eV'a değişmiştir.

Gözeneklilik ve nemin optik ve elektriksel özelliklerindeki oluşturduğu değişimler GS yüzeylerinin kimyasal aktivitesi ve GS mikrokristallerinde yük taşıyıcılarının kuantum sınırlama modeli temelinde yorumlandı.

Anahtar Kelime: Gözenekli Silisyum, yasak band genişliği, nem, öz direnç.

ABSTRACT

Owing to the visible photoluminescence and electroluminescence of porous silicon (PS) at room temperature, this material has attracted considerable attention. The structure of PS is characterised by a great number of micropores (2-50 nm in mean diameter), an extremely large surface area to volume ratio (up to $10^3 \text{ m}^2 \text{ cm}^{-3}$). Surface bonds, in particular Si-H and Si-O bonds, play an important role in regulating electrical, optical and gas sensing properties of PS. The optical and electrical properties of free-standing PS films are rarely considered.

In this work, influence of porosity of free-standing PS films on optical spectra and electrical properties is presented. Besides, humidity-stimulated and annealing changes of absorption spectra of PS films were considered. Besides, current density and illumination changes of porosity and thickness of PS films were investigated.

The PS films were prepared on n-type Si substrates by anodic etching under the white light illumination. The PS films were detached from silicon substrate by electropolishing. Porosity of films was determined by gravimetry. Free-standing PS films of thickness 5-15 μm and porosity (20-95) % were obtained. Electrical properties of films along and across of pores of PS were carried out.

The main results of this investigation are the following,

- (a) The rising of film porosity (from 30% to 90%) results in both the increase of band gap of PS (from 1.4 to 1.9 eV) and resistivity (from 2×10^4 to $4 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$) at room conditions,
- (b) The resistivity of films along pores is two tenth as large as than that in parallel direction,
- (c) The band gap of fixed porosity films in humid ambient in the range of 55-95 %RH increases from 1.6 to 1.8 eV.

The observed porosity-stimulated and humidity-stimulated changes optical and electrical characteristics were interpreted on the base model including the quantum confinement of charge carries in the PS microcrystallites and chemical activity of PS surfaces.

Keywords: Porous silicon, band gap, humidity, resistivity.

1. GİRİŞ

Gözenekli silisyum (GS) ilk defa 1956 yılında Uhlir tarafından tek kristal silisyumun hidroflorik asit (HF) içersinde elektrokimyasal aşındırma esnasında keşfedilmiştir.

Daha sonra Canham tarafından 1990 yılında, oda sıcaklığında görünür fotolüminesans verdiğinin keşfi ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Çünkü, bilindiği üzere silisyum elektronik ve yarıiletken teknolojisinde çok önemli olmasıyla birlikte indirekt band yapılı olmasından dolayı optoelektronik uygulamalarda yer alamamaktaydı. Ancak GS'un oda sıcaklığında fotolüminesansının keşfi ile optoelektronik alanında da silisyum kullanımına yol açmıştır.

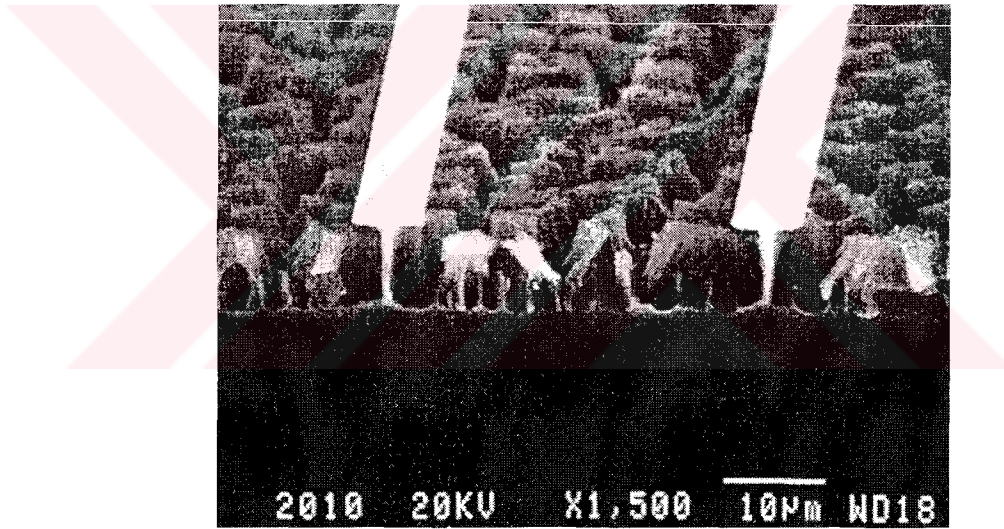
1991 yılında Lehmann ve Gösele gözenekli silisyumun optik geçirgenlik spektrumunu incelemişler ve GS filmlerin yasak band genişliğinin tek kristal silisyumunkinden fazla olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte fotolüminesans mekanizması hala tam olarak açıklanamamıştır. GS' un yapısı, oldukça geniş bir yüzey alanı (yaklaşık $10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ile karakterize edilmektedir. Yasak band genişliğinin tek kristal silisyumunkinden fazla olması ilk olarak kuantum sınırlama modeliyle açıklanmış olup, bu modele alternatif ve ek olarak bir çok model sunulmuştur. GS yüzey bağları özellikle, Si-H ve Si-O bağlarının GS' un optik, elektrik ve gaz duyarlılığı özelliklerinin ayarlanmasında önemli rol oynadıkları bilinmektedir. GS' un bu özellikleri ortam nemliliğine çok duyarlıdır. Birçok çalışmada GS filmlerin gözeneklilikle yasak band genişliği değişimi incelenmiş ancak nemliliğin yasak band genişliğine etkisi incelenmemiştir. Ayrıca GS/Si yapıların elektriksel özellikleri ile ilgili birçok çalışma olmasıyla birlikte GS filmlerin elektriksel özellikleri incelenmemiştir.

Bu çalışmada literatürden farklı olarak, GS yasak band genişliğinin nemliliğe bağlılığı ve GS filmlerin nem ve oda şartlarında gözeneklere paralel ve dik yönde öz dirençleri ölçülmüştür.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Gözenekli Silisyum

Gözenekli Silisyum (GS) oldukça geniş bir yüzey alanı (yaklaşık $10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ile karakterize edilen ve oda sıcaklığında görünür bölgede lüminesans veren bir malzemedir. Gözeneklilik makroskopik bir parametredir ve GS filmler hakkında mikroskopik bir bilgi vermediği için tartışmalara açık olabilir. Bu nedenle SEM analizi çalışmalara açıklık getirmiştir. Literatür bilgileri, n-tipi Si malzeme kullanılarak hazırlanan GS filmlerin gözenek boyutları p-tipine göre daha büyük olduğu ve katkı konsantrasyonu artması ile birlikte GS yapıdaki boşlukların azaldığı söylenmektedir (Şekil 2.1). Ayrıca anodizasyon şartlarının gözenekliliği değiştirdiği çeşitli yayınlarda SEM analizi ile verilmiştir (Smith ve Collins, 1992).



Şekil 2.1 GS' un SEM fotoğrafı (Bisi vd., 2000).

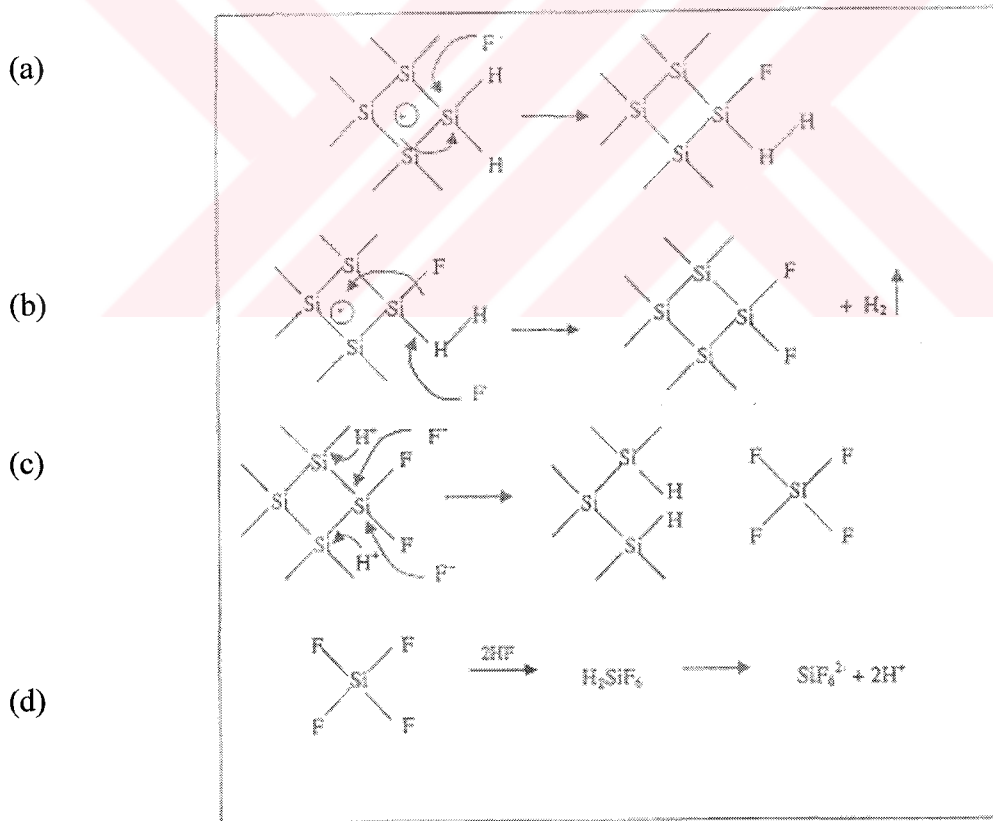
Bilindiği gibi GS film tek kristal silisyumun HF asit tabanlı elektrolitlerle elektrokimyasal yöntemle aşındırılması ile oluşturulmaktadır. Bu sistemlerde silisyum anod gibi davranır ve katot olarak platin kullanılır. Anod ile katot arasında gerilim farkı oluşturulduğunda Si altlık üzerinde birkaç mikrometre kalınlığında GS film oluşur. Birçok çalışmada GS' un yapısal ve elektriksel özelliklerinin üretim koşullarına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Akım yoğunluğu, HF asit konsantrasyonu, anodizasyon esnasında aydınlatma, tek kristal silisyumun tipi ve öz direnci, anodizasyon süresi GS yapının elektriksel, morfolojik ve optik özelliklerini değiştirdiği birçok farklı çalışmada verilmiştir.

Silisyum yüzeyi düşük pH'lı HF asit etkisiyle aşınmaz, ancak silisyumun anod olarak kullanıldığı anodizasyon işleminde uygulanan potansiyel farkı silisyumun HF ile aşındırılmasını sağlar. Gözenekli silisyumun oluşumu için HF asit içerisindeki silisyumun çözünme mekanizması 1991 yılında Lehmann ve Gösele tarafından açıklanmıştır (Şekil 2.2).

Bir boşluğun silisyum yüzeyine gelmesiyle F^- iyonlarının silisyum yüzeyine gelme eğilimi artar ve Si-H bağlarını yıkarak Si-F bağı oluştururlar (Şekil 2.2a). Si-F bağındaki F' un polarize etkisinden dolayı başka F^- iyonları da Si yüzeyine gelir ve H_2 açığa çıkar (Şekil 2.2b).

Si-F bağlarının oluşturduğu indüklenmiş polarizasyondan dolayı Si-Si bağlarındaki elektron yoğunluğu azalır ve Si-F yoğunluğu artar ve $SiF_6^{2-} + 2H^+$ tepkimesi oluşur (Şekil 2.2c,d).

Noguchi ve Suemuene 1993 yılında n-tipi silisyumda gözenekli tabakanın aydınlatma ile oluştuğu bildirildi



Şekil 2.2 GS oluşum mekanizması (Lehmann ve Gösele, 1991).

Halimaoui, 1997 ve sonra Pavesi, 1997 yılında yüksek ve düşük katkılı p-tipi tek kristal silisyumdan farklı HF konsantrasyonlarında elde edilen farklı akım yoğunluklu anodizasyon süreçlerinde akım yoğunluğu arttıkça gözenekliliğin arttığı sunulmuştur. Örneğin, yüksek akım yoğunluklarında ve düşük HF konsantrasyonlarında, gözeneklerin daha fazla genişlediği ve n-tipi silisyum tek kristali üzerinde hazırlanan GS'un gözenekliliğinin lineer boru şeklinde olmaya eğilim gösterdiği John ve Singh tarafından 1995 yılında simülasyon ile gösterilmiştir. Yine başka bir çalışmada Collins vd., 1997 yılında zayıf katkılı p-tipi silisyum ile yapılan GS süngerimsi bir morfolojiye sahipken, n-tipi ve yoğun katkılı p-tipi silisyum ile yapılan GS' un sütunlar halinde gözeneklendiğini ve gözenekliliğin 50-90 % oranları arasında artmasıyla birlikte lüminesans şiddetinin arttığını yayınlamıştır. Beale vd., 1985 yılında farklı morfolojili GS yapılar silisyumun tek kristal silisyumun katkı tipi, HF konsantrasyonu, anodizasyon akım yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak elde edilmiştir.

GS filmlerin elektriksel özellikleri ile ilgili bir çalışmayla şu ana kadar karşılaşmamakla birlikte, metal/GS/Si yapıların elektriksel özellikleri ile ilgili bir çok çalışma vardır.

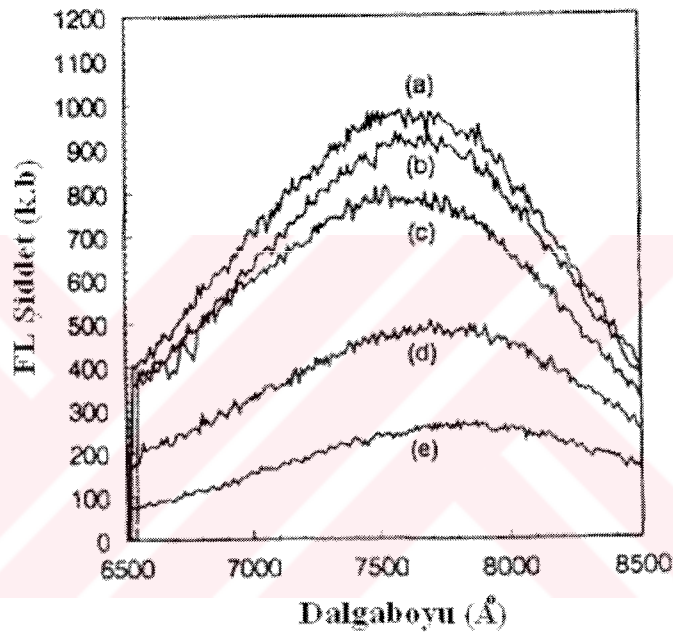
2.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik ve Lüminesans Özellikleri

1990 yılında Canham GS filmlerin yasak band genişliğinin Si'unkinden fazla olduğunu göstermiş ve yine 1991 yılında Lehmann ve Gösele optik geçirgenlik spektrumu ile p-tipi Si malzemeden oluşturulan GS tabakanın yasak band genişliğinin 1.5 eV olduğunu yayınlamışlardır.

Kanemitsu 1995 yılında GS' un optik özelliklerinin belirlenmesi için GS filmlerin Si altlıktan ayrılmaları gerektiğini savunmuş ve (100) yönelimli, p-tipi, öz dirençleri 0.01-230 Ωcm aralığında değişen silisyum kristallerinden anodizasyon akım yoğunluğu 1-30 mA/cm^2 olan süreçlerden elde ettiği GS/Si yapıları akım yoğunluğunu 0.7 A/cm^2 ye yükselterek birbirinden ayırmış ve kalınlıkları 20-40 μm arasında değişen GS ince filmleri $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ çözeltisinde yıkayarak elde etmiştir.

1996 yılında Chan vd., elde ettikleri GS/Si yapıları anodizasyon akım yoğunluğu 0.5 A/cm^2 ye yükselterek birbirinden ayırmış ve kalınlıkları 10-180 μm ve gözeneklilikleri %33-75 aralığında olan GS ince film olarak elde etmişlerdir.

GS filmler UV ile aydınlatıldığında turuncu/kırmızı görünür. Farklı hazırlanmış GS filmler için bu fotolüminesans karakteristikleri Tsai vd., 1991 yılında yaptığı çalışmaya göre, genellenirse; Fotolüminesans spektrum bölgesinin 600-900 nm bölgesinde olduğu açıkça gözlenir. Fotolüminesans spektrum piki 750-800 nm arasında uzanır. Spektrum piklerinin yerleri örneklerin hazırlanması şartları ile az da olsa değişebilir, ancak bölge çok fazla değişmez. Spektrum biçimi yakalaşık çan gibidir. 300°C' ye kadar tavlama ile fotolüminesans stabil kalır. Fotolüminesans 350-550°C aralığında tavlama etkisiyle keskin düşüş gösterir (Şekil 2.3). Si kolonların genişliğinin azalmasıyla ve spektrum maviye kayma gösterir.



Şekil 2.3 GS'un farklı sıcaklıklarda 5 dk' lık termal uygulamalar sonrası fotolüminesans spektrumları (a) oda sıcaklığı, (b) 300 °C, (c) 350 °C, (d) 400 °C, (e) 450 °C [Tsai vd., 1991].

Fotolüminesans mekanizmasını açıklamak için birkaç model sunulmaktadır. Canham tarafından sunulan modele göre, elektron-delik çiftinin birleşerek ışık yaymasının nanometre boyutlu silisyum teller içinde olduğu ve GS filmlerin yasak band genişliğinin kuantum sınırlama etkisi ile kristal silisyumunkinden daha fazla olduğu savunulmaktadır. Bu modelin 1993 yılında Koch vd., tarafından modifiye edilerek sunulduğu çalışmada, elektron-delik çiftinin nm boyutlu Si parçacıklarda foto-uyarıldığı ve rekombinasyonla ışık saçmanın silisyumun kendi yüzey durumları yoluyla olduğu kabul edilmektedir.

Üçüncü grup ise bir ve ikinci grubun sundukları modellerin kombinasyonu olan bir modeli savunmaktadır. Xu vd., 1999 yılında GS filmlerin optik soğurma değişimini havada ısıtma süreciyle ölçmüş ve yasak band genişliğindeki azalmayı Si-O bağlarının formasyonuna bağlamışlardır. Sagnes vd., 1993 yılında gözenekliliğin % 45-79 aralığında değiştiği GS filmlerin soğurma spektrumlarını ölçmüş ve gözenekliliğin artmasıyla spektrumların maviye kaydığını gözlemlemişlerdir. Bazı çalışmalarda (Brandt, vd., 1982, Tsai vd., 1991, Prokes vd., 1992) lüminesansın bazı özel SiH_x kompleksleri, polisilanes, veya SiO_2 gibi lüminesans materyallerin nm Si kendi yapısal özelliklerinden ziyade, sebep olduğu sunulmuştur. Bir başka çalışma ise, Qin ve Jie, 1993 yılında yük taşıyıcılarının uyarılmasının nm boyutlu Si parçacıklar içinde oluştuğunu ve SiO_x tabakalarının etrafındaki lüminesans merkezlerine (defekt ve katkılar) doğru foto uyarılmış taşıyıcıların transfer edildiğini kabul etmektedir.

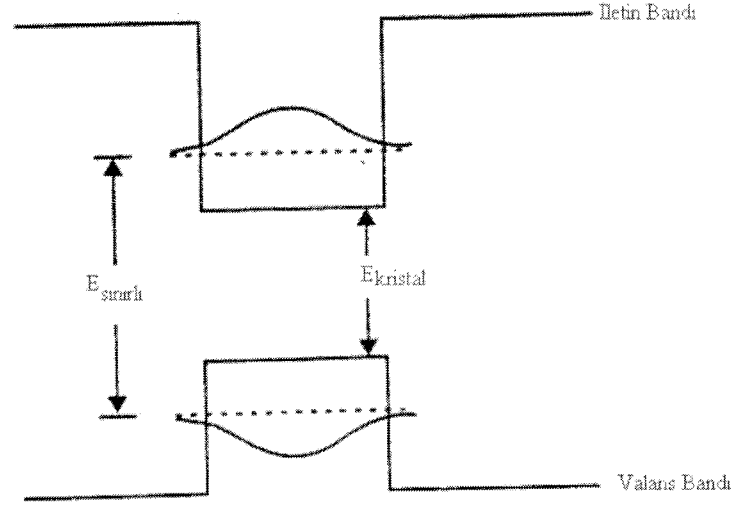
Toparlamak gerekirse, GS' da görünür fotolüminesansın mekanizma ve temelinin açıklamak için sunulan modeller üç ana gruba ayrılabilir. İlk grup lüminesans etkisinin nm boyutlu Si' un kendi yapısal özelliklerine bağlarken, ikinci grup nanokristal dış yüzeylerinin ilerlediği bir süreç (örneğin, GS yüzeylerinde) ile birlikte açıklamıştır. Bu süreçler GS yüzeylerindeki materyallerin yapısı ve kompozisyonları ile belirlenmektedir. Üçüncü grup ise bu iki modelin kombinasyonunu savunur.

1990 yılında Canham tarafından verilen kuantum sınırlama modeli GS'un lüminesans mekanizmasını ilk açıklayan ve temel modeldir. GS yapıların fotolüminesans mekanizmasının açıklanabilmesi için sunulan birkaç farklı model aşağıda açıklanmıştır.

1. Kuantum Sınırlama Modeli

Silisyum yasak band genişlikli yaklaşık 1.10 eV olan, indirekt band yapılı bir yarıiletken ve bu yüzden görünür bölgede ışık saçmaz. Fotolüminesans spektrumu açıklamak için, yük taşıyıcılarının GS tellerde hapsedikleri düşüncesi önerilmiştir. Bu düşünceye göre, GS yapıdaki bu kuantum teller içerisindeki yük hapsi yapının band aralığını tek kristal silisyumunkinden direkt rekombinasyonların olabileceği şekilde arttıracaklarını savunmaktadır. Şekil 2.4' te, bir yarıiletken kuantum kuyusu şemasını gösterilmektedir. İletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki delikler potansiyel engeller ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle

en düşük enerjili optik geçişin enerjisi artmıştır. Yani bu, malzemenin yasak band genişliği artmış demektir.



Şekil 2.4 Tek boyutlu yarıiletken kuantum kuyusunun şematik gösterimi (Collins vd., 1997).

Etkin kütle yaklaşımı ile sınırlandırılmış enerji aralığı,

$$E_{sg} = E_g + \frac{\eta^2 \pi^2}{2} \left[\frac{1}{\omega_x^2} + \frac{1}{\omega_y^2} + \frac{1}{\omega_z^2} \right] \left[\frac{1}{m_i^*} + \frac{1}{m_v^*} \right] \quad (2.1)$$

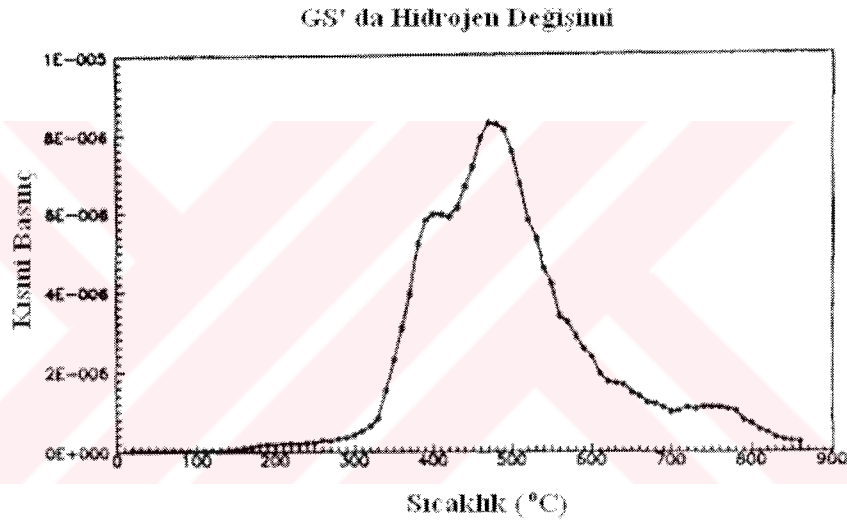
Burada, E_{sg} sınırlı bölgenin yasak band genişliği, m_i^* iletkenlik m_v^* valans bandlarında yük taşıyıcılarının etkin kütleleridir. $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ sınırlandırılmış bölgenin boyutlarıdır.

2. Siloxene Modeli

Siloxene bir Si:H:O tabanlı polimerdir ve GS' un anodizasyonu sırasında oluştuğu öne sürülmüştür. 111 düzlemlerinde herbirinin bir diğeri üzerine yığılmasıyla oluşan bir tabaka formundadır. Seviyelerde valans elektronları H ve OH grupları ile doyurulur. Siloxene ve türevlerinin fotolüminesans özellikleri uzun zamandır bilinmektedir. GS'un fotolüminesansının keşfinden hemen sonra siloxene ve türevleri Xu vd., 1992 yılında GS lüminesans mekanizmasının temeli olarak sunulmuştur. Bunun sebebi, silisyum iskelet ile gözenekler arası arayüzeyde bu komplekslerin oluşabilirliği ile gösterilmiş, GS' un FTIR ve Raman spektrumunda fotolüminesans sinyalinin yerinin siloxeninkiyle benzerliği şaşkınlık yaratmıştır.

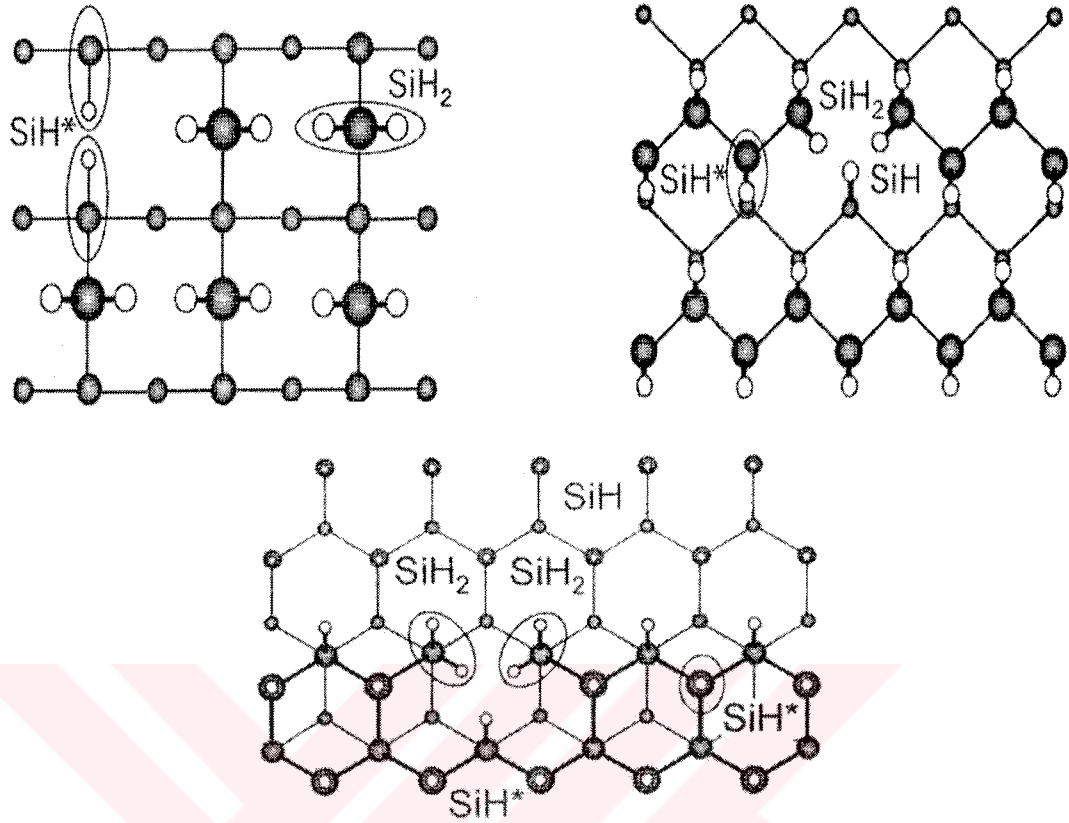
3. Silisyum Hidrid Kompleks Modeli

Bu model, GS iskeletin yüzeyinde formlanmış hidrojen zengin (örneğin, Si-H, Si-H₂) grupların fotoluminesansa sebep olduğunu önermektedir. Lüminesans gözlemlerinde rekombinasyon merkezleri olarak görev alan bu gruplarda H bağlarının titreşimleri FTIR spektrumları ile gözlenmektedir. Joshi, tarafından 1995 yılında yapılan deneylerde uygun sıcaklıklarda hidrojenin GS' da Si-H ve Si-H₂ enerjilerinin değiştiği gösterilmiştir (Şekil 2.5). Sıcaklık belirli bir sınırın üzerine çıkarıldığında hidrojen konsantrasyonunun azalması modelin dezavantajı olmakla birlikte GS filmler yeniden HF elektrolite daldırılarak hidrojen zenginleştirildiği öne sürülmüştür. Allongue vd., hidrojenin Si altlıkla etkileşiminin gözenek yapısı ve silisyumun aşındırma süreçlerinde önemli rol oynadığını rapor etmiştir.



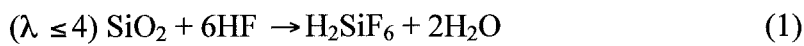
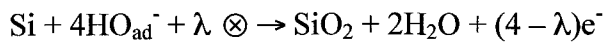
Şekil 2.5 20 °C ile 900 °C arasında tavlama etkisiyle GS'da hidrojenin değişimi (Joshi, 1995).

2001 yılında Kimura vd., de bu modeli destekleyen bir yayın yapmışlardır. Bu makalede farklı yönelimli Si altlıklarda GS tabaka oluşumunun ilk aşaması araştırılmıştır. Yayına göre, Si (100) üzerinde, SiH₂'nin taşınmasıyla sözü edilen monohidrid (SiH*) türün üretimi gözlenmiştir. Si (110)' da ise SiH*'nin taşınmasıyla SiH₂ yapının formlandığı gözlenmiştir. (Şekil 1.6) Si (111)'in aşındırma sürecinde ise durum diğerlerinden farklıdır. Aşındırmanın ilk aşamasında diğer hidrid türlerinin konsantrasyonunda bir azalma olmaksızın sadece SiH₂ yerleşmiştir (Şekil 2.6). Çalışma, SiH*'ın aşınma oranının dihidrid türler kadar yüksek olduğunu teklif etmektedir .



Şekil 2.6 Aşındırma süresince atomik bağ konfigrasyonu (a) Si (100) yüzeyi, (b) Si (110) yüzeyi, (c) Si (111) yüzeyi (Kimura vd., 2001).

1999 yılında Chen vd., tarafından verilen çalışmada n-tipi (111) yönelimli ve 0,005-0,01 Ωcm öz direçli Si altlıklarla hazırlanan GS filmler üzerinde yapılan çalışmalara göre; Düşük enerjili saçılmaları kuantum sınırlama modeli ve yüksek enerjili saçılmaları ise yüzey durum rekombinasyonlarından dolayı oluştuğunu önermişlerdir. Bu yüzeydeki bileşimlerin ise Si-OH kompleksleri olduğu FTIR spektrumları ile belirlenmiştir. n-tipi GS' un optik özelliklerinin p-tipine göre daha stabil olduğu gösterilmiştir. Si'un anodik çözülmesini ise



denklemleri ile açıklamışlardır.

Burada, HO_{ad}^- ve F_{ad}^- adsorbe edilmiş iyonlar, ve $\otimes$ ve e^- ise sırasıyla delik ve elektronu göstermektedir. Bu reaksiyon denklemlerine göre, n-tipi Si' un aşındırılması çok zordur. Çünkü, reaksiyon boşluğa ihtiyaç duyar. Bu problemin üstesinden GS filmlerin elektrokimyasal anodizasyon ile oluşturulması esnasında silisyumun parlak yüzeyi aydınlatılmasıyla boşluk yük taşıyıcıları oluşturularak gelinmiştir. Bunlara ek olarak birçok çalışmada optik geçirgenlik spektrumu yöntemi kullanılarak yasak band genişliğinin gözeneklilikle değişimi incelenmiştir.

4. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Modeli

Bu modele göre GS' un lüminesans vermesinin sebebi anodizasyon esnasında oluşan hidrojenli amorf fazdır (a-Si:H). Gerçekte bu yapı görünür bölgede fotolüminesans bandına sahiptir. Bu modele karşı yapılan TEM çalışmalar GS yapıda çok az amorf Si yapı bulunduğunu açıklanmıştır.

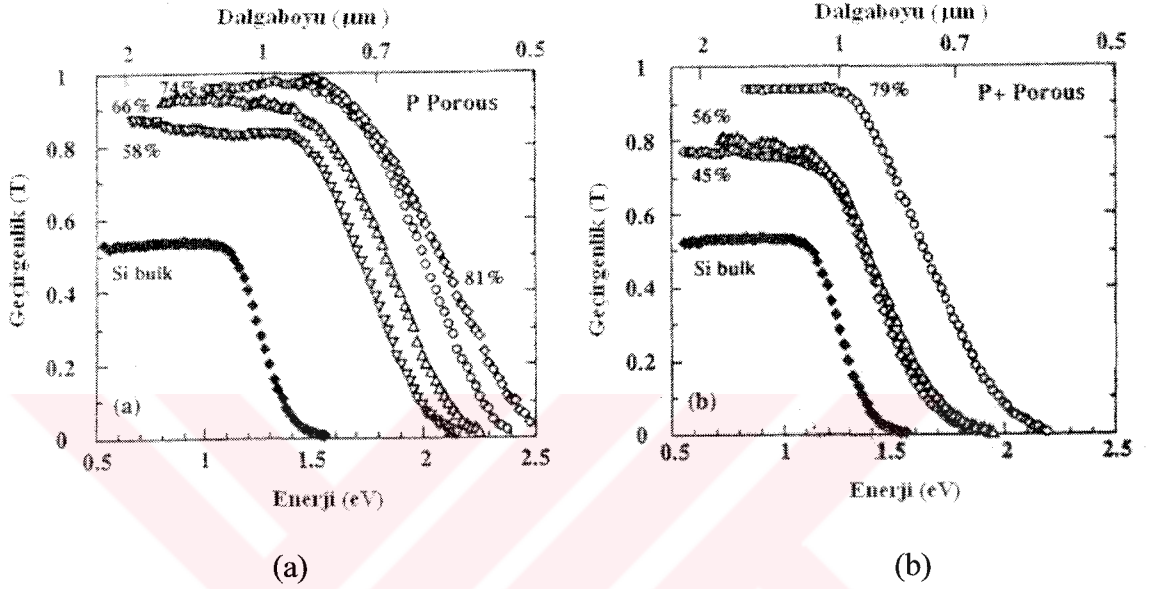
Xu vd., 1999 yılında yaptığı çalışma GS filmlerin optik ve elektriksel karakteristiklerinin gözenekliliğe bağlılığı dikkate nadiren alınan çalışmalardan biridir. 1993 yılında, Sagnes vd., tarafından (100) yönelimli, yüksek ve düşük katkılı p-tipi Si'dan hazırlanan GS filmler üzerinde yapılan optik çalışmalarda; düşük enerjilerde gözeneklilik arttıkça, geçirgenliğin arttığı, gözenekliliğin artmasıyla birlikte kırılma indisinin azaldığı, geçirgenlik spektrumlarında gözenekliliğin artmasıyla birlikte yüksek enerjilere doğru açıkça bir kayma gözlemlendiği ve bu kaymanın eşit gözenekli örnekler için, düşük katkılı p-tipi örnekte yüksek katkılı örneğe göre daha fazla olduğunu sunmuşlardır (Şekil 2.7).

1999 yılında Xu vd., tarafından verilen raporda, (111) p-tipi $0.015 \Omega\text{cm}$ öz direçli Si kullanılarak hazırlanan GS filmler Si altlıktan ayrılarak optik geçirgenlik spektrumları alınmıştır. Şekil 2.8' de görüldüğü gibi gözeneklilik %41' den %94' e artarken bir mavi bölgeye kayma gözlenmiştir. Aynı zamanda düşük enerjilerde geçirgenlik (T_0) gözeneklilikle birlikte artmıştır. Yine aynı çalışmanın sonuçlarından biri de kuantum sınırlama modelini destekleyerek gözeneklilikle birlikte kırılma indisinde görülen azalmadır. Gözeneklilik %41, %79, %94 ve sırasıyla kırılma indisi 2.81, 1.46 ve 1.22 olarak,

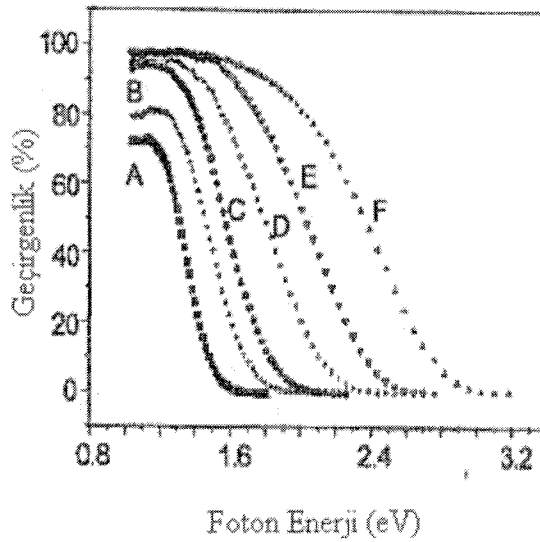
$$T_0 = 2n / (n^2 + 1) \quad (2.2)$$

formülünden hesaplanmıştır.

Böylece GS filmlerin yasak band genişliğinin gözeneklilikle arttığı saptanmıştır. Aynı çalışma GS filmlerin fotoluminesans şiddetinin de gözeneklilikle arttığını göstermiştir. Bu çalışmada yasak band genişliğinin 1.15-1.8 eV aralığında gözeneklilikle arttığını bildirmişlerdir. Yapılan çalışmada düşük gözeneklilikte GS'un filmlerin indirekt band yapısı gösterdiği ve % 80 üzerindeki gözeneklilikte lineer bölgenin uzatılamadığı ancak %94 gözeneklilikte direkt band yapısına da uymadığını savunmuşlardır.



Şekil 2.7 Farklı gözeneklilikli GS filmlerin($d=40\mu\text{m}$), 300 K' de geçirgenlik-enerji spektrumları (a)p-tipi Si ($\rho=1\Omega\text{cm}$), (b) p⁺-tipi Si ($\rho=10^{-2}\Omega\text{cm}$) (Sagnes vd., 1993).



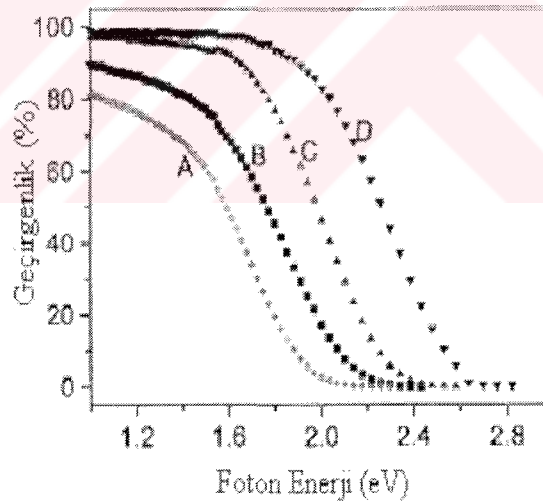
Şekil 2.8 Farklı gözenekliliğe sahip GS filmler için optik transmisyonun foton enerjisine bağlı değişimi (A) %41, (B) %64, (C) %73, (D) %79, (E) %89, (F) %94 gözenekli (Xu vd., 1999).

1999 yılında Rotaru vd., GS filmlerin optik özellikleri ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada ise, anodizasyon süresinin artmasıyla birlikte kırılma indisinin azaldığı öne sürülmüştür.

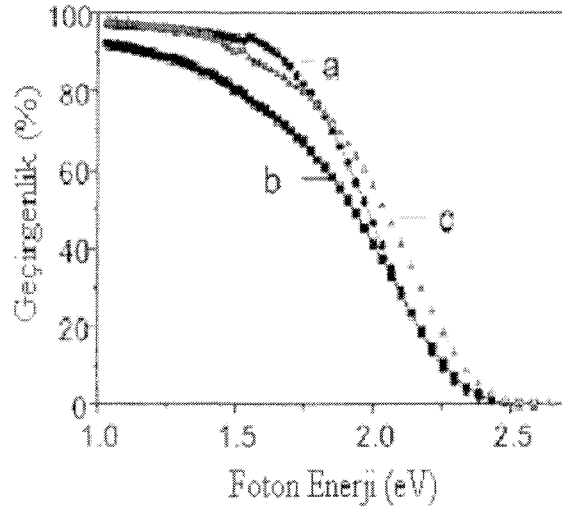
Bilgilerimiz dahilinde, yukarıdaki kısa literatür özetinden de anlaşıldığı üzere GS filmlerin yasak band genişliğine nemin etkisi şimdiye kadar araştırılmamıştır.

Ayrıca, biz çalışmalarımızda n-tipi tek kristal silisyum kullandık ve GS filmlerin band yapılarının optik soğurma spektrumlarına dayanarak GS filmlerin direkt band yapılı olduklarını keşfettik.

Xu vd., 2000 yılında sundukları yayında, 200 °C ısı oksidasyon süresince GS filmlerin optik soğurma spektrumlarının değişimi gözlenmiştir. Deneylerde kullanılan GS filmler yüksek ve düşük katkılı tek kristal silisyumdan elde edilmiştir. Deneylerinin sonuçlarında başlangıçta kırmızıya kayan geçirgenlik spektrumlarının ısı oksidasyon süresince maviye kaydığını gözlemlemişlerdir. GS filmlerin yasak band genişliğinin kuantum sınırlama modeline dayanarak ısı oksidasyon süresince arttığı ve belirli bir ısı oksidasyon sonrasında Si:O bağlarının soğurumu nedeniyle azaldığı sonucuna varmışlardır (Şekil 2.9 ve 10).



Şekil 2.9 Farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin geçirgenliğinin foton enerjisiyle değişimi (A) %58, (B) %72, (C) %81 ve (D) %87 (Xu vd., 2000).



Şekil 2.10 % 75 gözenekliliğe sahip GS filmin geçirgenliğinin foton enerjisiyle değişimi (a) ısıtıl işlem öncesi (b) 200 °C de 40 saat oksidasyon sonrası, (c) 200 °C de 200 saat oksidasyon sonrası (Xu vd., 2000).

2.3 Silisyumun Elektriksel ve Yapısal Özellikleri

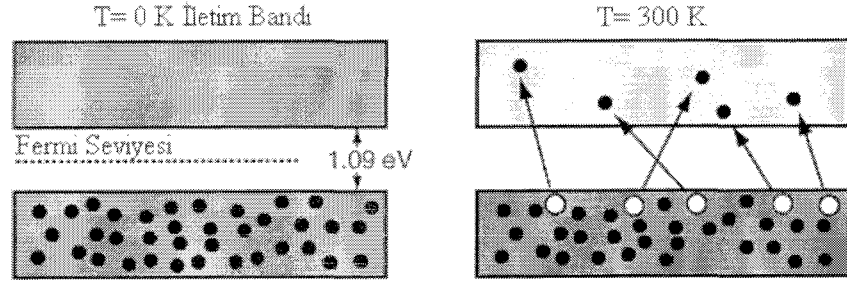
Katı cisimler elektrik özelliklerine göre; iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üçe ayrılırlar. İletkenlerde sıcaklık arttıkça iletkenlik azalırken yarıiletkenlerde artmaktadır. $T = 0$ K de iyi birer yalıtkandırlar (Şekil 2.11) ve elektriksel öz dirençleri oda sıcaklığında 10^{-4} - 10^{10} (Ωcm) arasında değişmektedir (Caferov, 2000). Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan yarıiletkenlerin en önemlisi periyodik tablonun IV. grubunda yer alan ve enerji aralığı yaklaşık 1.10 eV olan silisyumdur (Si). Bu yarıiletkenin bazı özellikleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkeninin bazı özellikleri (Caferov, 2000).

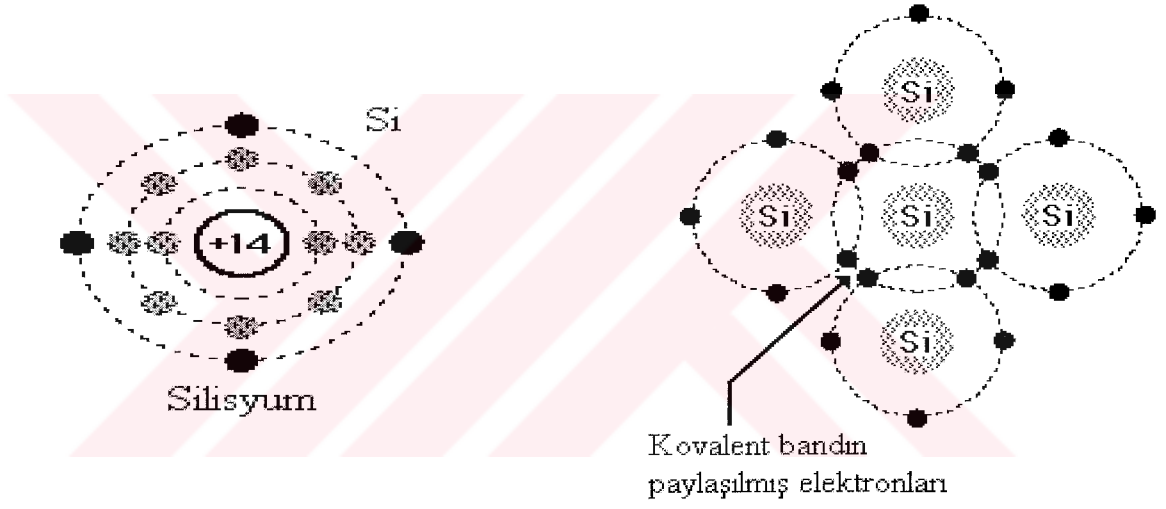
Özellik

Ergime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1420
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

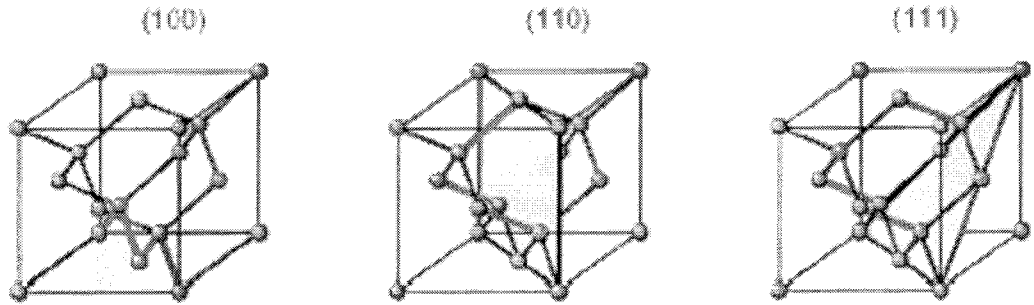
Bu elementin atom numarası 14 olup, elektron konfigrasyonu $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ‘ dir. Bu konfigrasyondan da görüldüğü gibi valans bandında dört elektron bulunan Si atomu kovalent bağlanmayla karakterize edilir (Şekil 2.12) ve kristal yapısı elmas kübik yapıdadır (Şekil 2.13).



Şekil 2.11 Silisyumun band yapısı [1].



Şekil 2.12 Silisyumun atom yapısı [1,2].



Şekil 2.13 Silisyum kristalinin yapısı [2].

İstenilen özelliklere sahip yarıiletken elde edebilmek, bazı katkı atomları yarıiletken materyale katkılanmak ile mümkün olmaktadır.

Si atomuna periyodik cetvelin V. grup elementlerinden (As, Sb, P, N) biri katkılındığında n-tipi Si elde edilir. V. grup elementlerin son yörüngelerindeki beş valans elektronu bulunur. Bu elektronların dördü Si atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ kurar, kalan elektron ise katkı atomuna zayıf elektriksel kuvvet ile bağlıdır ve çok kolay iyonlaşır. Yani katkı atomu Si kristaline bir elektron vermiş olur ve bu elektron örgü içerisinde bağımsız hareket edebilir. Katkı atomu elektron verdiği için donör, donör atomları ile katkılı Si ise n-tipi olur (Şekil 2.14a,b). Donör atomlarının yarıiletken içerisinde bulundukları enerji seviyesi, Şekil 2.14c' de görüldüğü gibi yasak band aralığında ve iletim bandı alt sınırı yakınındadır.

Donör enerji seviyesi E_d ,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H \quad (2.3)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, ϵ_r ; yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, m_e ; elektronun kütlesi ve E_H ; 13.6 eV hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir.

n-tipi yarıiletkende donörün iyonlaşmasıyla valans bandında delik oluşmaz. Donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu delik konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte elektronların rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle n-tipi yarıiletkenlerde çoğunlu yük taşıyıcıları (n) elektronlar azınlık yük taşıyıcıları (p) ise deliklerdir.

Si atomuna periyodik cetvelin III. grup elementlerinden (In, Ga, Al, B) biri katkılındığında p-tipi Si elde edilir. III. grup elementlerin son yörüngelerinde üç valans elektronu bulunur. Bu elektronların üçü Si atomunun üç valans elektronu ile kovalent bağ kurar, ancak III. grup atomun bir elektron eksikliği vardır ve bu nedenle de atomun elektron bağlarından biri boş kalır. Bu delik diğer Si = Si bağlarından kapılan bir elektronla doldurulabilir ve delik elektronun yerine geçer. Böylece Si atomunun valans bandında bir delik oluşur ve örgü içerisinde III. grup elementten bağımsız olarak hareket eder. Yani katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olur (Şekil 2.15a,b). Katkı atomu elektron aldığı için akseptör, akseptör atomları ile

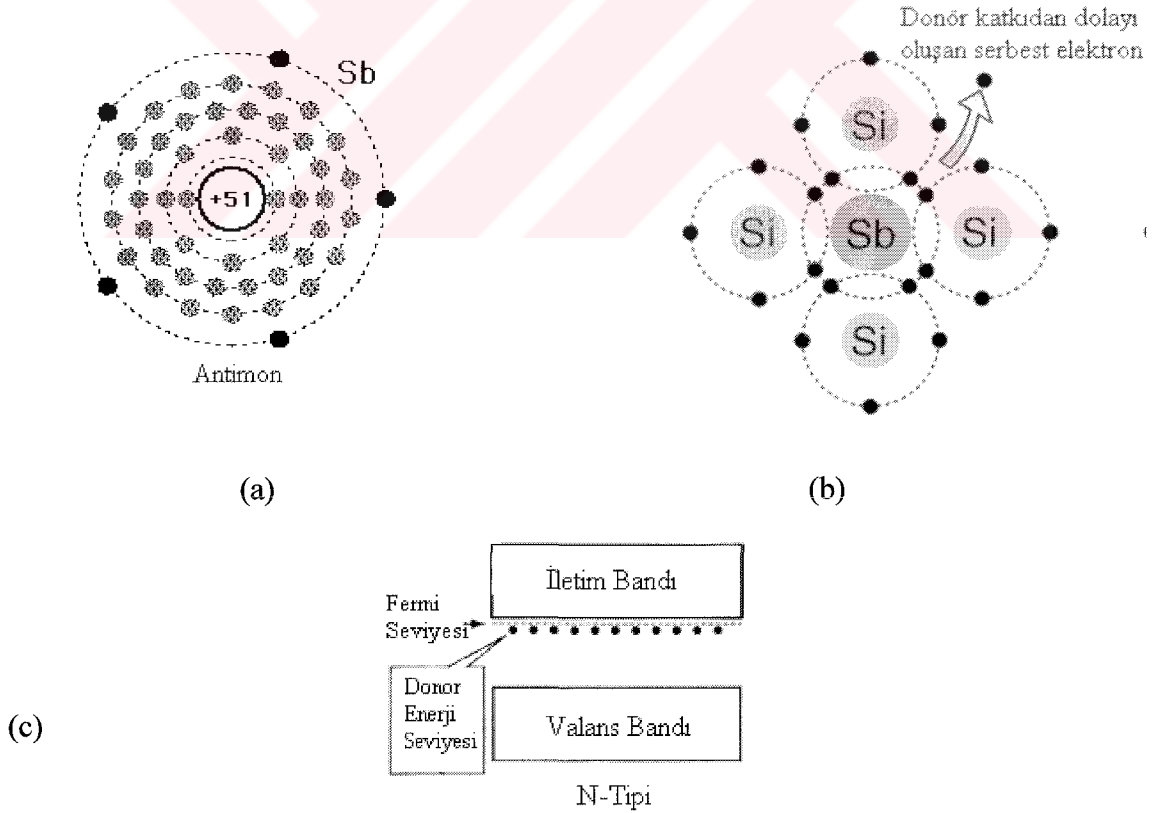
katkılı Si ise p-tipi olur. Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde bulundukları enerji seviyesi, yasak band aralığında ve valans bandı üst sınırı yakınındadır (Şekil 2.15c) .

Akseptör enerji seviyesi E_a ,

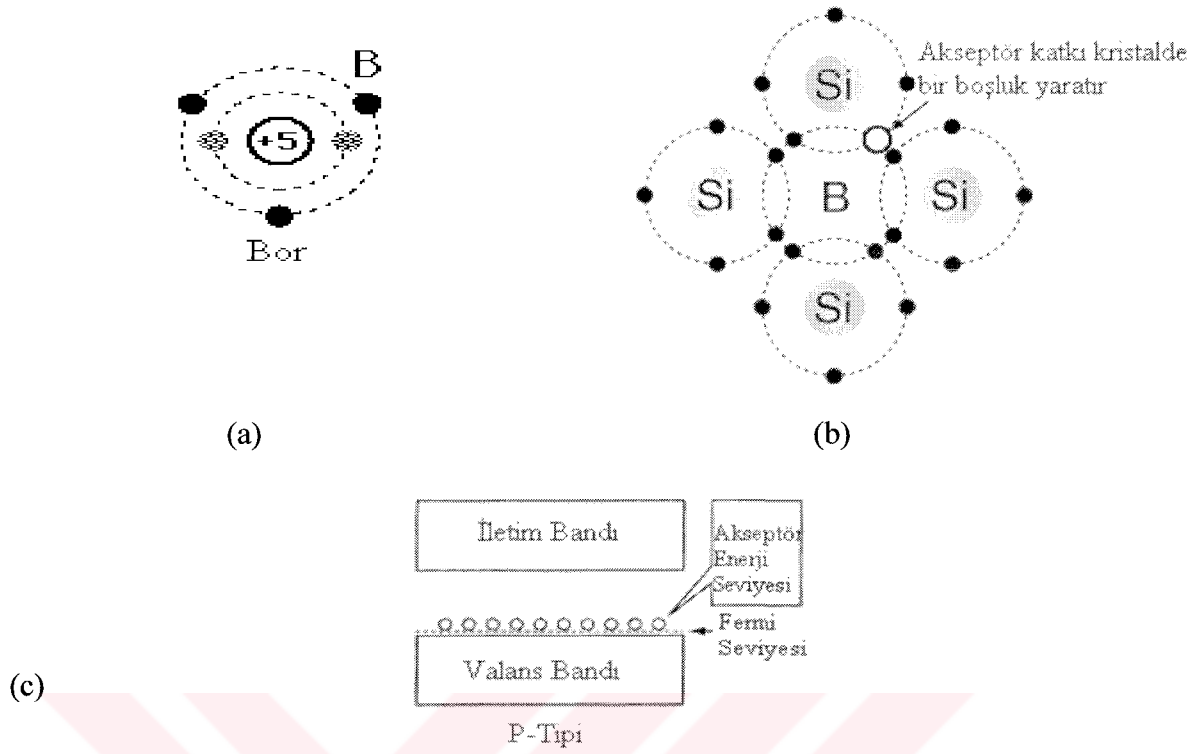
$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h} \right) E_H \quad (2.4)$$

bağıntısı ile verilir. Burada, ϵ_r ; yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, m_e ; elektronun kütlesi ve E_H ; 13.6 eV hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir.

p-tipi yarıiletkende akseptör atomunun valans bandından bir elektron koparmasıyla valans bandında delik oluşur ancak bu boşluğa karşılık iletim bandına bir elektron çıkmaz. Akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarıiletkende valans bandındaki delik konsantrasyonu iletim bandındaki elektron konsantrasyonundan büyük olacağından, elektriksel iletkenlikte deliklerin rolü daha fazla olacaktır. Bu nedenle p-tipi yarıiletkenlerde çoğunlu yük taşıyıcıları (p) delikler azınlık yük taşıyıcıları (n) ise elektronlardır.



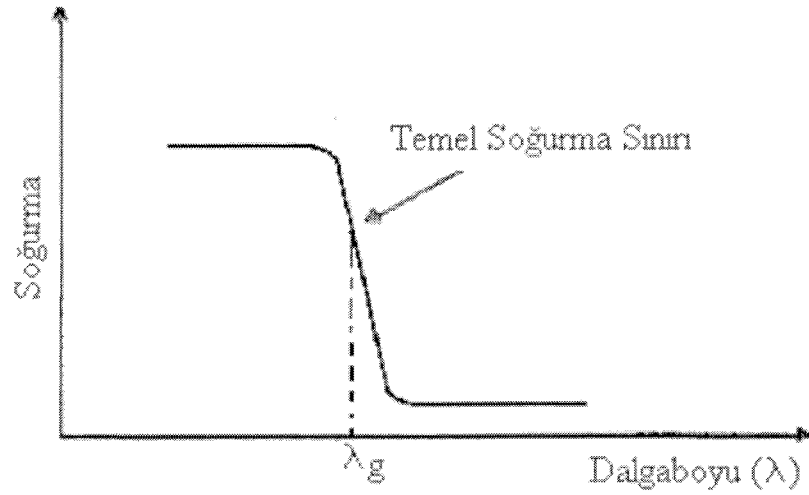
Şekil 2.14 (a) Sb atom yapısı, (b) Sb katkılı n-tipi Si atom yapısı, (c) n-tipi yarıiletkenlerin band yapısı [1,2].



Şekil 2.15 (a) Bor' un atom yapısı, (b) Bor katkılı n-tipi Si atom yapısı, (c) p-tipi yarıiletkenlerin band yapısı [1,2].

2.4 Direkt ve İndirekt Yarıiletkenlerin Band Diyagramları

Yarıiletkenlerde soğurma oluşması birkaç mekanizma ile gerçekleşmektedir. Bunlardan en önemlisi, elektronların valans bandında iletim bandına geçmesiyle meydana gelmektedir. Bir elektron, yarıiletkenine gelen elektromagnetik dalgadan bir foton ($h\nu$) soğurarak valans bandından iletim bandına geçtiğinde valans bandında bir delik oluşur. Yarıiletken malzeme üzerine düşen fotonun enerjisi en az malzemenin yasak band genişliği kadar olmalıdır. Şekil 2.16' da, yarıiletkenler için şematik soğurma spektrumu görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi; $\lambda_{foton} < \lambda_g$ dalga boylu fotonlar yarıiletken tarafından soğurulurken, $\lambda_{foton} > \lambda_g$ dalga boylu fotonlar ise hemen hemen hiç soğurulmadan yarıiletken malzemeden geçerler. Bundan dolayı Şekil 2.16' da görülen bu iki bölgeyi ayıran sınır, temel soğurma sınırı olarak adlandırılır.

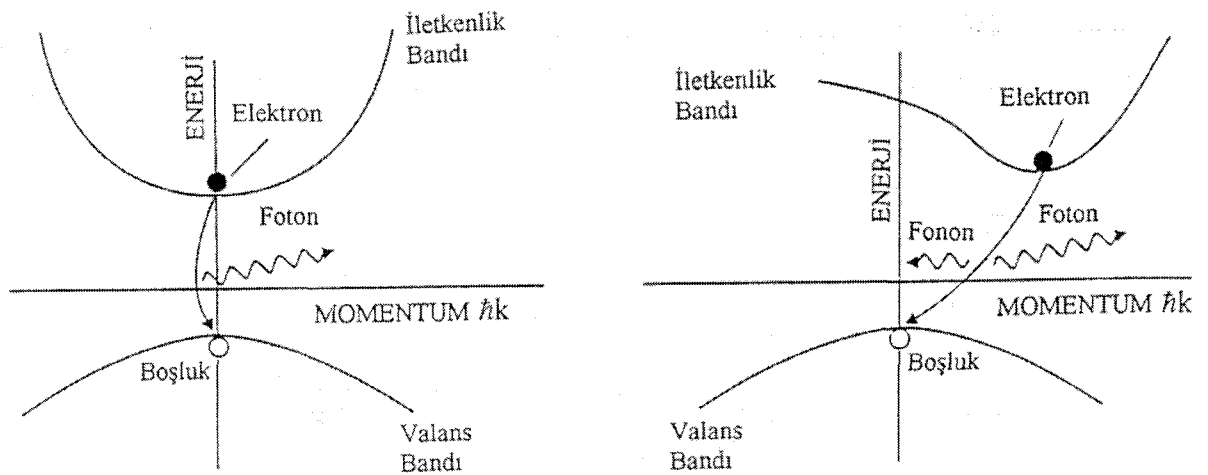


Şekil 2.16 Yarıiletken malzeme için temel soğurma spekturumu.

Temel soğurma sınırında, yarıiletkenin soğurduğu foton, valans bandındaki bir elektronu, yasak band genişliğini aşıtarak iletim bandına çıkarması iki şekilde olabilir:

- (1) Direkt Geçişler
- (2) İndirekt Geçişler

Şekil 2.17' de direkt ve indirekt bantlı yarıiletkenlerin band yapıları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.17 (a) Direkt, (b) İndirekt yarıiletkende yasak band aralığı yakınındaki band yapısının gösterimi (Collins vd., 1997).

Direkt bandlı yarıiletkenlerde elektron valans bandından iletim bandına dalga vektöründe veya momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan geçer. Eğer yarıiletkenin band yapısı Şekil 2.17a' da gösterildiği gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı aynı doğrultuda ($\vec{k}=0$) ise böyle yarıiletkenlere direkt band geçişli yarıiletkenler denir. Bu enerji-momentum uzayında dalga vektörü değişiminin sıfır olması anlamına gelir ($\Delta \vec{k} = 0$).

Direkt band geçişinde eksiton oluşumu veya elektron-delik etkileşmesi ihmal edildiğinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki ilişki,

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.5)$$

$(h\nu - E_g)^{1/2}$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini vermektedir.

İndirekt yapılu yarıiletkenlerde (Şekil 2.17b) iletken bandı tabanı ile valans bandı tavanı k momentum uzayında farklı değerlerdedirler. Bu enerji momentum uzayında dalga vektöründeki değişimin sıfırdan farklı olması anlamına gelir ($\Delta \vec{k} \neq 0$). Bu geçişte enerji korunur ancak soğrulan fotonun momentumunun çok küçük olmasından dolayı, valans bandındaki bir e^- nun iletim bandına geçebilmesi için, ortamdaki bir fononun, kristaldeki örgü atomlarının titreşimi, soğrulması veya ortama yayılması gerekmektedir.

İndirekt band geçişinde, soğurma katsayısı α ile gelen fotonun enerjisi ($h\nu$) arasındaki bağıntı,

$$\alpha = B(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2 \quad (2.6)$$

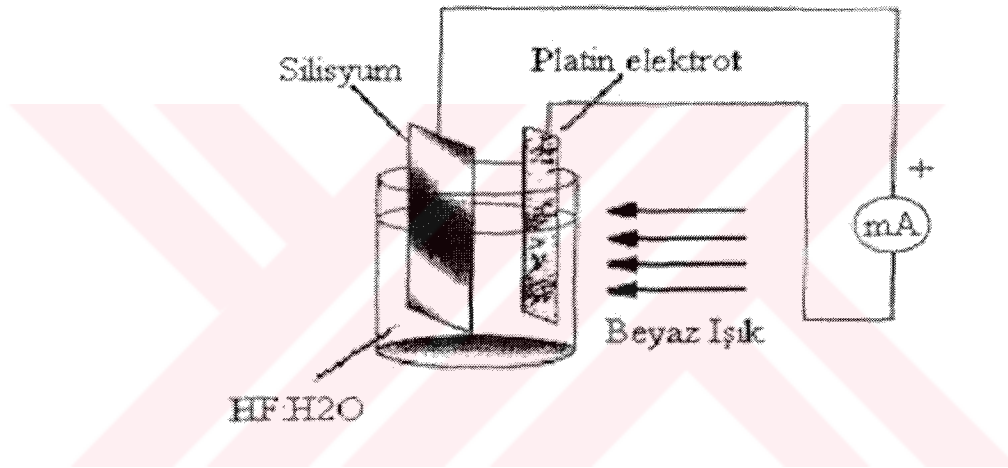
ifadesi ile verilir. Burada, E_{fn} fononun enerjisidir. $\pm$ fononun soğrulması ve saçılması ile bağıntılıdır. $(h\nu - E_g \pm E_{fn})^2$ ifadesini sıfır yapan değer, yarıiletkenin yasak band genişliğini vermektedir.

Tek kristal silisyum indirekt band yapısına sahipken (Şekil 2.17b), çalışmalarımızda GS direkt band yapılu olduğu keşfedilmiştir. GS yapının oda sıcaklığında lüminesans vermesi durumu direkt band yapısıyla ilişkilidir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Gözenekli Silisyum/Silisyum Yapıların ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Elde Edilmesi

GS/Si yapıları n-tipi (Sb katkılı) (111) yönelim ve $1 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$ öz dirençli tek kristal Si üzerinde $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$; 1:3 çözeltisi içerisinde, sabit akım yoğunluğu altında ve beyaz ışık aydınlatması eşliğinde (75W, 12V holojen lamba) elektrokimyasal anodizasyon yöntemiyle aşındırılması sonucunda elde edildi. Anodizasyon işleminin gerçekleştiği hücrenin şematik gösterimi Şekil 3.1’ de görülmektedir.



Şekil 3.1 Elektrokimyasal anodizasyon hücresi şematik gösterimi.

Şekil 3.1’ den de görüldüğü gibi silisyum anot, platin ise katot görevi üstlenmektedir. Anodizasyon işlemi başlamadan önce silisyum kristalinin bir yüzü parlatıldı ve alkol ile temizlendi. Aydınlatma parlak yüzeye doğru olacak şekilde anodizasyon hücresine yerleştirildi. Deneylerde aydınlanma şiddeti ölçümleri Oriel 70261 termopile ile alındı. Işık şiddetine bağlı deneyler hariç tüm deneylerde ışık kaynağı silisyum kristaline 10 cm uzaklıkta tutuldu ve akım yoğunluğuna bağlı deneyler hariç diğer tüm örnekler 15 mA/cm^2 akım yoğunluğu uygulandı. Anodizasyon süresi, akım yoğunluğu, aydınlatma şiddeti gibi elektrokimyasal anodizasyon şartları değiştirilerek homojen farklı özellikte GS/Si yapılar elde edildi.

GS filmler anodizasyon akım yoğunluğu ani olarak 0.8-1 A/cm² yükseltilerek elektrokimyasal cilalama yöntemi ile GS/Si ekleminden ayrıldı ve GS filmler elde edildi. Bu çalışmada GS filmlerin gözeneklilik, kalınlık, direnç ve yüzey morfolojileri (SEM) incelendi. Bundan başka, GS filmlerin yasak band genişliğinin ve direncinin gözenekliliğe ve nemliliğe bağlılığı araştırıldı.

3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1 Gözeneklilik ve Kalınlık

Ortalama gözeneklilik, ağırlık ölçüm yöntemi kullanılarak belirlendi (% 20-95).

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \quad (3.1)$$

Burada, m_1 : elektrokimyasal anodizasyon işlemi öncesindeki kristal Si altlığın kütlesi, m_2 : elektrokimyasal anodizasyon işlemi sonrası GS/Si yapının kütlesi ve m_3 : elektrokimyasal cilalama ile GS film tek kristal Si' dan ayrıldıktan sonra Si altlığın kütlesidir. Kütleler, And HM-200 marka 0.1 mg duyarlıklı terazi ile tartıldı. GS filmlerin kalınlıkları (5-15 µm), 0.001mm duyarlıklı dijital elektronik mikrometre yardımı ile ölçüldü.

3.2.2 Gözenekli Silisyum/Silisyum Yapıların SEM Analizi

GS/Si yapılarının SEM ¹(Scanning Electron Microscopy) analizleri JSM – 5410LV Scanning Microscope cihazı kullanılarak üst ve kenar kısımlarından yapıldı.

3.3 Tek Kristal Silisyum ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Ölçümleri

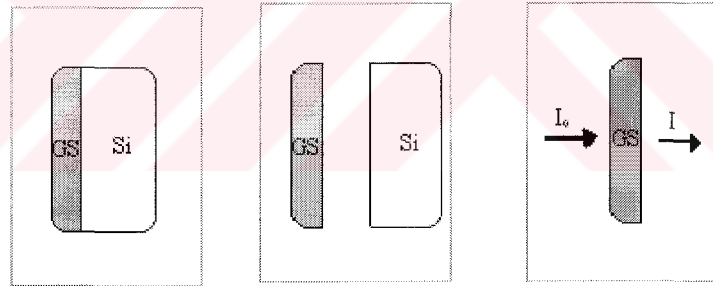
Tek kristal Si ve GS filmlerin 300-1100 nm aralığında görünür bölge spektrumları incelendi. Bu ölçümler “UV/VIS Lambda 2S” Perkin Elmer Spektrometresi ile yapıldı.

¹ Y.T.Ü Fen-Ed. Fak. Kimya-Metalürji Fakültesi

Tek kristal Si örnek görünür bölge spektrumunun alınması için öncelikle kimyasal inceltme işlemine tabi tutuldu. Tek kristal Si 0.4HF: 0,6HNO₃ karışımının içine atıldı ve reaksiyon Si gerekli kalınlığa gelince su ile seyreltilerek durduruldu. İncelen örneğin her iki yüzü kalından inceye doğru kullanılan zımpara tozları ile zımparalanarak inceltme tamamlandı. Daha sonra Önce 3µm ve sonra 1µm elmas pasta ile her iki yüzü parlatıldı ve alkolle yıkanarak temizlendi. Kalınlığı mikrometre yardımı ile 62 µm olarak ölçüldü. Ölçülen geçirgenlik spektrumu analiz edilerek tek kristal silisyumun yasak band genişliği (2.6) formülü kullanılarak belirlendi.

GS filmlerin kalınlıkları parlatma işlemi için çok ince olduğundan dolayı optik spektrumları parlatma yapılmadan alındı ve aynı analizlerle yasak band genişlikleri belirlendi.

Optik spektrum yöntemi kullanılarak (Şekil 3.2) oda şartlarında (%40 RH), farklı nem ortamlarında ve tavlama süreçlerinden sonra alınan geçirgenlik spektrumlarından GS filmlerin yasak band genişlikleri (2.5) formülü kullanılarak belirlendi.



Şekil 3.2 Optik ölçüm şeması

d kalınlıklı örneğin geçirgenlik spektrumundan soğurma katsayısı (α) aşağıdaki formüllerle hesaplandı

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (3.2)$$

$\alpha d \gg 1$ ise

$$T = \frac{I}{I_0} = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (3.3)$$

T: örneğin optik geçirgenliği, I_0 : örneğe gelen ışık şiddeti, I: örnekten çıkan ışık şiddeti, d: GS filmin kalınlığı, α : soğurma katsayısı, R: yansıtma katsayısıdır.

İnce filmlerin kırılma indisi (n) girişim geçirgenlik spekturumundan belirlenir ve

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (3.4)$$

tekrar oranı formülü kullanılarak analiz edilir. Burada λ_1 ve λ_2 ardışık dalgaboylarının maksimum veya minimumlarıdır.

Yansıtma katsayısı ise;

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (3.5)$$

formülü kullanılarak hesaplanır. Bizim hesaplamalarımızda $R= 0.03$ olarak kullanılmıştır (Palma-Martin vd., 2001) ve örneklerimizin kalınlıkları 5-15 μm arasında değişmektedir.

Nemde Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Ölçümleri

1 m^3 havadaki su buharının kütlesi mutlak nem olarak tanımlanır. Mutlak nem havadaki su buharının yoğunluğu ($\rho_{sb}(\text{gr}/\text{cm}^3)$) ile belirlenir. Kendi suyu ile dengede olan buhara doymuş buhar denir. Doymuş buharın basıncı sıcaklığına ve kimyasal bileşimine bağlıdır. ($\rho_{db}(\text{gr}/\text{cm}^3)$) doymuş su buharının yoğunluğudur.

Bağıl nem (RH: Relative Humidity):

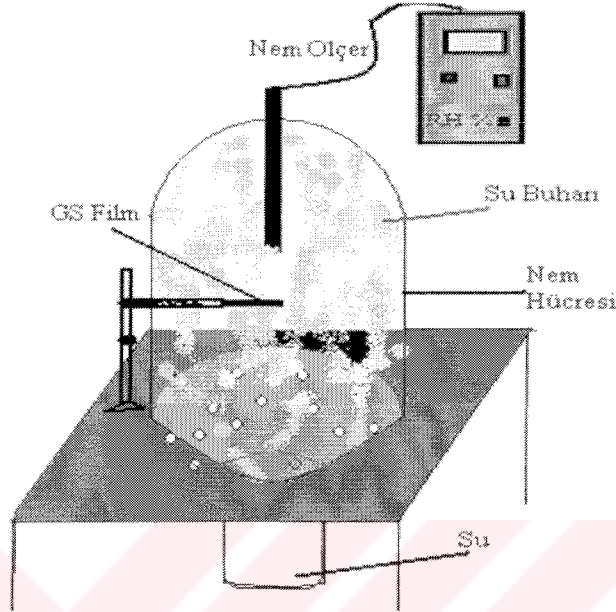
$$RH = \frac{\rho_{sb}}{\rho_{db}} \times 100 \quad (3.6)$$

bağıntısı ile belirlenir.

$$RH = \frac{m_{sb}}{m_{db}} \times 100 \quad (3.7)$$

olarak da yazılabilir (Öztemel, 1999). Burada m_{sb} ve m_{db} sırasıyla subuharının ve doymuş su buharının kütleleridir.

Deneylerimizde nemin hem optik özelliklere hem de öz direnç üzerine etkisi belirlendi. Nem oranı (% 35-100) ölçümü için “Extech-444701 Hygro-Thermometer” aleti kullanıldı.



Şekil 3.3 Nem Hücresi

Sabit gözenekliliğe sahip GS filmler havada ve vakumda 100 °C de tavlandı. Daha sonra alınan geçirgenlik spektrumları analiz edilerek yasak band genişlikleri belirlendi.

Lüminesans ışık yayma anlamına gelmektedir. Rekombinasyon ışınması ise, değişik yüklü parçacıkların ayrılması için harcanan enerjiyi geri vererek birleşmesiyle ışık yayılmasına denir. Yarıiletkenlerde elektron-delik çifti oluşması ve geri dönüşümü veya uyarılmış yük taşıyıcılarının denge konumlarına geri dönmesi ile ışık saçılır. Fotolüminesans bir lüminesans çeşididir ve burada uyarıcı foton olduğu için adı fotolüminesanstır.

Lüminesans verimi direkt band yapılı yarıiletkenlerde yüksektir. Ancak indirekt band yapılı yarıiletkenlerde fotolüminesans verimi çok düşüktür.

Bu çalışmada GS/Si yapıların fotolüminesans spektrumları “ U-1000 Jobin Yvon double grating Spectrometer ” cihazıyla alınmıştır.

3.4 Tek Kristal Silisyum ve Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Ölçümleri

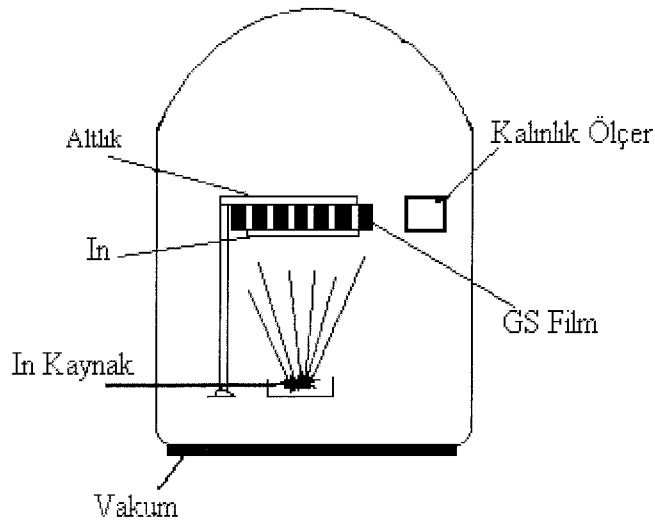
Tek kristal silisyumun öz direnci ve yük taşıyıcılarının konsantrasyonu oda sıcaklığında Van der Pauw ve yöntemi ve Hall ölçümleriyle belirlendi.

3.4.1 Omik Kontaktların Hazırlanması

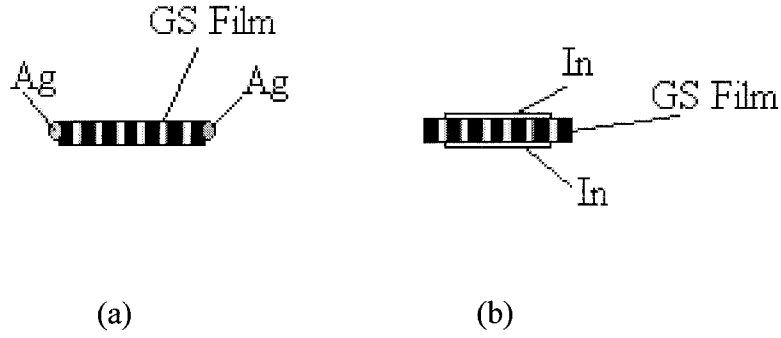
GS filmlerin dirençleri gözeneklere paralel ($\rho_{||}$) ve dik yönde ($\rho_{\perp}$) ölçüldü. Dik yöndeki ölçümler için elektron-demeti buharlaştırma tekniği kullanılarak, vakum sisteminde (Şekil 3.4) GS filmlerin her iki tarafına yaklaşık 120-180 nm kalınlığında indiyum (In) kaplandı. In filmin kalınlığı “ Deposition Controller (Inficon, Leybold) ” cihazı ile buharlaştırma esnasında ölçüldü ve ayrıca kaplanan indiyum (In) kalınlığı teorik olarak,

$$d = \frac{\Delta m}{2\pi h^2 \rho} \quad (3.8)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplandı. Burada; Δm : buharlaştırılan In kütlesi, ρ : In yoğunluğu (7.33 g/cm^3), h : In kaynağın GS filme olan uzaklığıdır.



Şekil 3.4 GS filmlerin yüzeylere In kaplamak için kullanılan vakum sisitemi.



Şekil 3.5 (a) Gözeneklere paralel yönde direnç ölçümü için hazırlanan GS filmlerin şematik çizimi, (b) Gözeneklere dik yönde direnç ölçümü için hazırlanan GS filmlerin şematik çizimi.

Şekil 3.5 (a) gözeneklere paralel yöndeki direnç ölçümleri ve Şekil 3.5 (b) gözeneklere dik yöndeki direnç ölçümleri için hazırlanan örnekler şematik gösterilmiştir.

Örneklerin dirençleri çok büyük olduğu için, ölçümler seri bağlı yüksek direnç devrelerinde yapıldı (Şekil 2.6). Bu devrede seri bağlı direnç $50\text{ M}\Omega$ olarak kullanıldı.

Tüm ölçümler için öz direnç hesabı,

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (3.9)$$

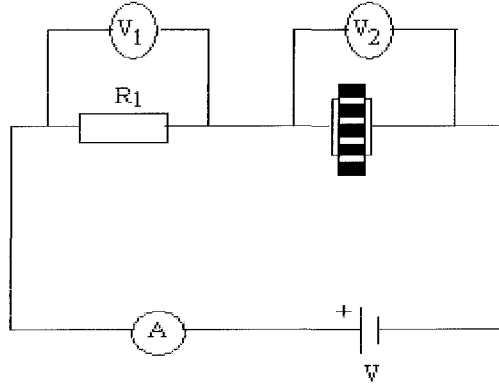
bağıntısından hesaplandı. Burada R: örneğin direnci, ρ : örneğin öz direnci, l: kontaklar arası mesafe ve A: kontakların kesit alanıdır.

Direnç belirlenmesinde yapılan ölçümlerde “Thurby 1503 dijital multimetre” kullanıldı.

$$V = V_1 + V_2 \quad (3.10)$$

$$I = V_1 / R_1 \quad (3.11)$$

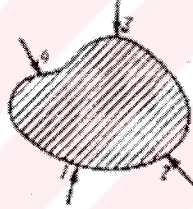
$$R_{\text{örnek}} = V_2 / I \quad (3.12)$$



Şekil 3.6 GS filmlerin direnç ölçümlerinde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.

3.4.2 Van der Pauw Yöntemi ile Özdirenç Ölçümleri

Bu yöntem Şekil 3.7 'de görüldüğü gibi, örneğin geometrisine bağlı olmadan düzlemsel plaka şekilli materyallerin özdirençlerinin ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır (Caferov, 1998).



Şekil 3.7 Van der Pauw yöntemi kontak yerleşim gösterimi (Caferov, 1998).

Şekil 3.7' ye göre, ilk önce 1-4 kontakları arasından akım (I_{14}) geçirilir ve 2-3 kontakları arasından gerilim farkı okunur (V_{23}) ve R_1 direnci formül (3.13)' den hesaplanır.

$$R_1 = \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (3.13)$$

Sonra, 1-2 kontakları arasından akım (I_{12}) geçirilerek 3-4 kontakları arası gerilim farkı (V_{34}) okunur ve R_2 direnci formül (2.14)' ten hesaplanır.

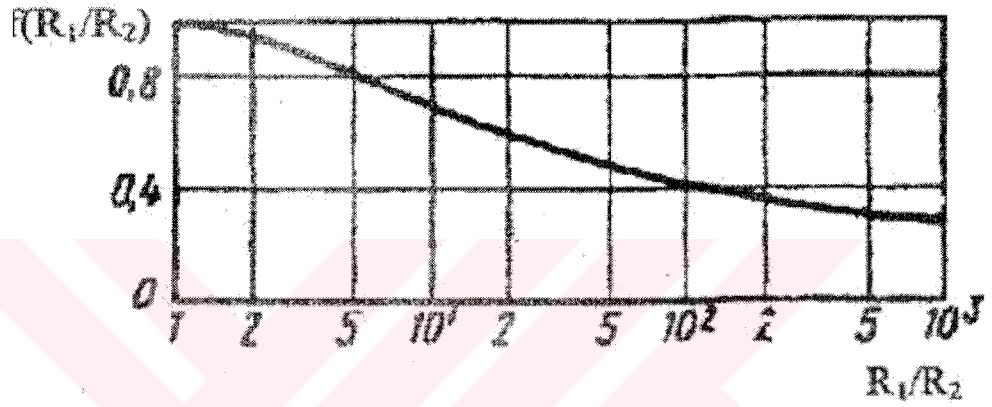
$$R_2 = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (3.14)$$

Van der Pauw teorisine göre öz direnç;

$$\rho = \frac{\pi b}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3.15)$$

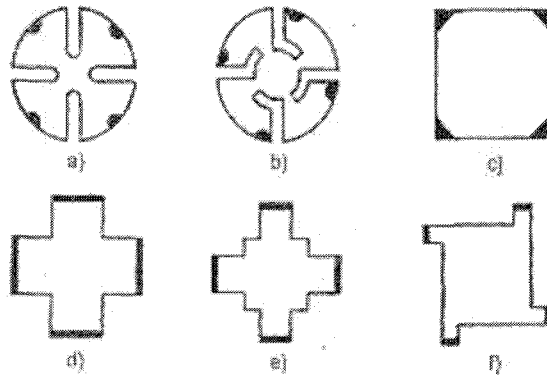
bağıntısı ile hesaplanır.

Burada b örneğin kalınlığı, $f(R_1/R_2)$ düzelme fonksiyonudur ve bu fonksiyonun grafiği Şekil 3.8' de verilmektedir.



Şekil 3.8 $f(R_1/R_2)$ düzelme fonksiyonu grafiği (Caferov, 1998).

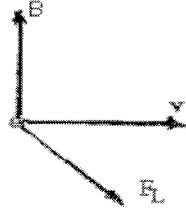
R_1/R_2 oranı birden çok az ($\pm \%10$) farklı olduğu durumda, bu yöntemle örneklerin öz direnci yüksek doğrulukla ölçülmektedir. Kontakların alanı büyük ve örneğin kenarından düzlem yüzeyine doğru yayılırsa, ölçüm hatası artar. Bu sebepten dolayı bu hataları ortadan kaldırmak için, özel geometrik formlu örnekler kullanılmalıdır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Van der Pauw yönteminde öz direnç ölçümünde kullanılan örneklerin geometrik formları (Caferov, 1998).

3.4.3 Yük Taşıyıcı Konsantrasyon Ölçümleri

1879 yılında Hall, altın örnekten akım geçirirken, aynı anda bir manyetik alana yerleştirdiğinde, örneğin iki zıt kenar yüzeyi arasında bir gerilim oluştuğunu keşfetmiştir. Bu olay, Hall olayı olarak tanınır ve manyetik alanda hareket eden elektrik yüklerine Lorentz kuvvetinin etkisi ile ilgilidir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Manyetik alandaki (B) pozitif yüklü parçacığın hızını v ve Lorentz kuvvetinin F_L yönlerinin gösterimi (Caferov, 1998).

Lorentz kuvvetinin değeri,

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) + q\vec{E} \quad (3.16)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

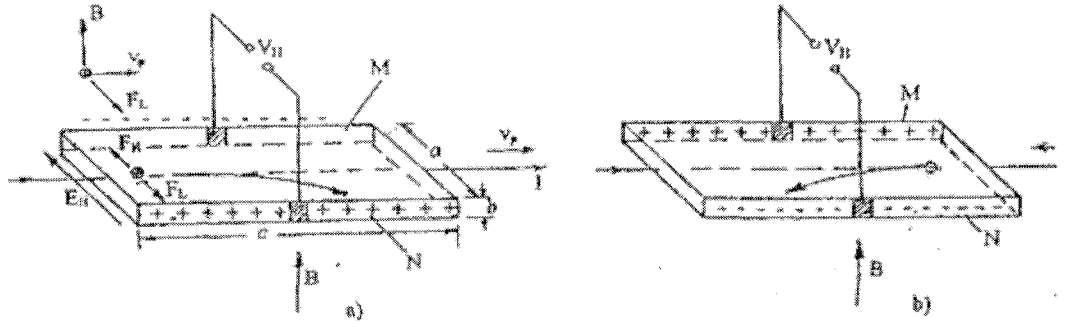
Yarıiletken içerisindeki yük taşıyıcılarına manyetik alanda Lorentz kuvvetinin etkisine bakılırsa;

p-tipi yarıiletkenler için; akım ve pozitif yüklü boşlukların hareket yönü aynıdır (Şekil 3.11a) ve etki eden Lorentz kuvveti,

$$\vec{F} = +e(\vec{v} \times \vec{B}) + e\vec{E} \quad (3.17)$$

bağıntısı ile verilir. Burada(+e) boşlukların yüküdür. Boşlukların hızı (v), manyetik indüksiyon vektörüne ($\vec{B}$) dik olduğu için (3.17) denklemi (3.18) şeklinde yazılabilir.

$$F_L = e v B + e E \quad (3.18)$$



Şekil 3.11 (a) p-tipi ve (b) n-tipi yarıiletkenlerde Hall olayı (Caferov, 1998).

Manyetik alanda boşluklar Lorentz kuvvetinin etkisiyle örneğin N yüzeyi yönünde hareketlenirler. Bu yüzeye karşı, M yüzeyinde ise negatif yüklü parçacıklar toplanırlar. Böylece, yarıiletkenin N ve M yüzeylerinde yük dengesi bozulur ve bu yüzeyler arası Hall gerilimi (V_H) veya Hall elektrik alanı (E_H) oluşur. Pozitif yüklü boşluklara etki eden Hall alanının kuvveti F_H ile Lorentz kuvveti (F_L) birbirine zıt yöndedir (Şekil 3.11). Bu kuvvetler eşitlendiğinde ($F_L = F_H$), başka yük taşıyıcıları kenar M ve N yüzeylerinde son bulur ve manyetik alan başka yük taşıyıcıların hareketine etki göstermez.

Lorentz kuvveti ile Hall alanının kuvveti denge durumunda

$$F_L = F_H \quad (3.19)$$

$$e\mathcal{B} = eE_H \quad (3.20)$$

olur. Burada v boşlukların ortalama ısısal hızlarıdır. Hall alanı (E_H) ve Hall gerilimi (V_H) arasındaki ilişki denklem (3.21) ile belirlenir.

$$E_H = \frac{V_H}{a} \quad (3.21)$$

Burada a örneğin Hall alanı yönündeki boyutudur.

Akım yoğunluğu,

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{ab} = pe\mathcal{B} \quad (3.22)$$

bağıntısı ile verilir. Burada p boşlukların konsantrasyonudur. (3.22) denkleminde boşlukların

hızı çekilip (3.20) denkleminde yerine yazıldığında Hall gerilimi için,

$$V_H = \frac{1}{pe} \frac{IB}{b} \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilir. Burada b örneğin manyetik alan yönündeki boyutu (kalınlığı)'dır. (3.23) denklemi,

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (3.24)$$

$$R_H = \frac{1}{pe} \quad (3.24a)$$

şeklinde yazılabilir. Burada R_H Hall sabitidir.

Hall olayını n-tipi yarıiletkenler için incelersek, n-tipi yarıiletkenler için; akımın yönü elektronların hareket yönüne terstir (Şekil 3.11b) ve bu yüzden manyetik alanda, elektronlar N yüzeyinin etrafında toplanırlar ve Hall alanının (E_H) yönü örneğin M yüzeyinden N yüzeyine doğru yönelmektedir.

n-tipi yarıiletkenlerde M ve N yüzeyler arası oluşan Hall gerilimi,

$$V_H = -\frac{1}{ne} \frac{IB}{b} \quad (3.25)$$

bağıntısı ile verilir.

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (3.26)$$

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (3.27)$$

Yarıiletkenlerde Hall sabitinin işareti çoğunluk yük taşıyıcılarının işareti ile belirlenir. (-) işaret n-tipi, (+) işaret p-tipi iletkenliği temsil eder. Hall sabitinin daha doğru ifadesi A Hall faktörü olmak üzere,

$$R_H = \frac{A}{pe} \quad (3.28)$$

$$R_H = -\frac{A}{ne} \quad (3.29)$$

şeklinde tanımlanır.

Hall sabitinin, Hall gerilimi ile ilişkisi,

$$R_H = \frac{V_H b}{IB} \quad (3.30)$$

ifadesi ile verilmektedir. Yani bir yarıiletken örneğin Hall sabitini (yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu) bulmak için örnekten geçen akım, Hall gerilim manyetik indüksiyon ve örneğin kalınlığının ölçülmesi gerekmektedir.

Yarıiletkenlerin Hall sabitinin belirlenmesinde iki yöntem kullanılmaktadır: (1) Ölçümlerin örnek geometrisinin dikdörtgen olması durumunda yapılması, (2) Serbest geometrili örnekler için ölçüm alınması (Van der Pauw Yöntemi).

Katkılı yarıiletkenler için, Hall sabiti, yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ve mobilitesi,

$$R_H (cm^3 C^{-1}) = 10^8 \frac{V_H b}{IB} \quad (3.31)$$

$$n, p (cm^{-3}) = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R} \quad (3.32)$$

$$\mu (cm^2 V^{-1} s^{-1}) = R \sigma \quad (3.33)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada birimler V(mV), I(mA), b(cm), B(Gauss).

Geometrisi düzgün olmayan örneklerde yapılan Hall ölçümlerinde ise, şekil 3.7' de görülen $B = 0$ iken ve $B \neq 0$ iken 1-3 kontaklarından akım (I_{13}) geçirilir ve 2-4 kontakları arası potansiyel farkı $V_{24}(0)$ ve $V_{24}(B)$ okunur. Örnekte manyetik alan etkisiyle oluşan Hall gerilimi,

$$V_H = V_{24}(B) - V_{24}(0) = R_H \frac{I_{13} B}{b} \quad (3.20)$$

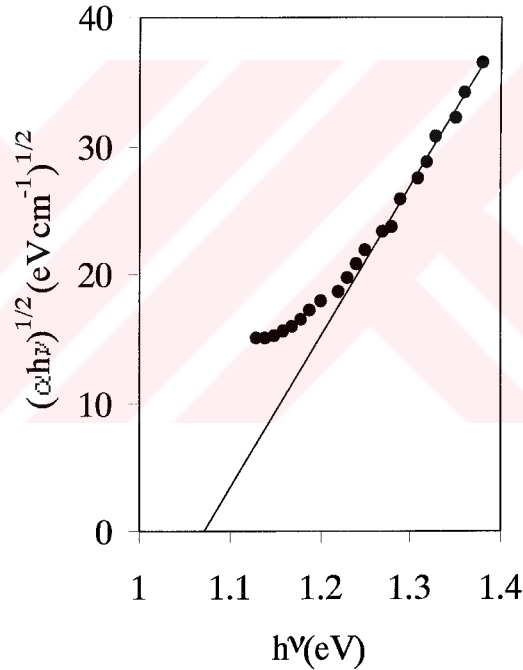
bağıntısı ile verilir. Burada b: örneğin manyetik alan doğrultusundaki boyutudur (kalınlık). Bu ölçümde omik kontak alanları çok küçük olmalı ve örneğin tam kenarına yapılmalıdır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Tek Kristal Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri

Deneylerimize başlamadan önce ana malzememiz olan silisyum için elektriksel ve optik ölçümler alındı.

Tek kristal Si' un öz direnci $\rho=1.3 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$, iletkenlik n-tipi olarak ölçüldü. Yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, $n=2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve mobiliteleri $\mu=165.4 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplandı.

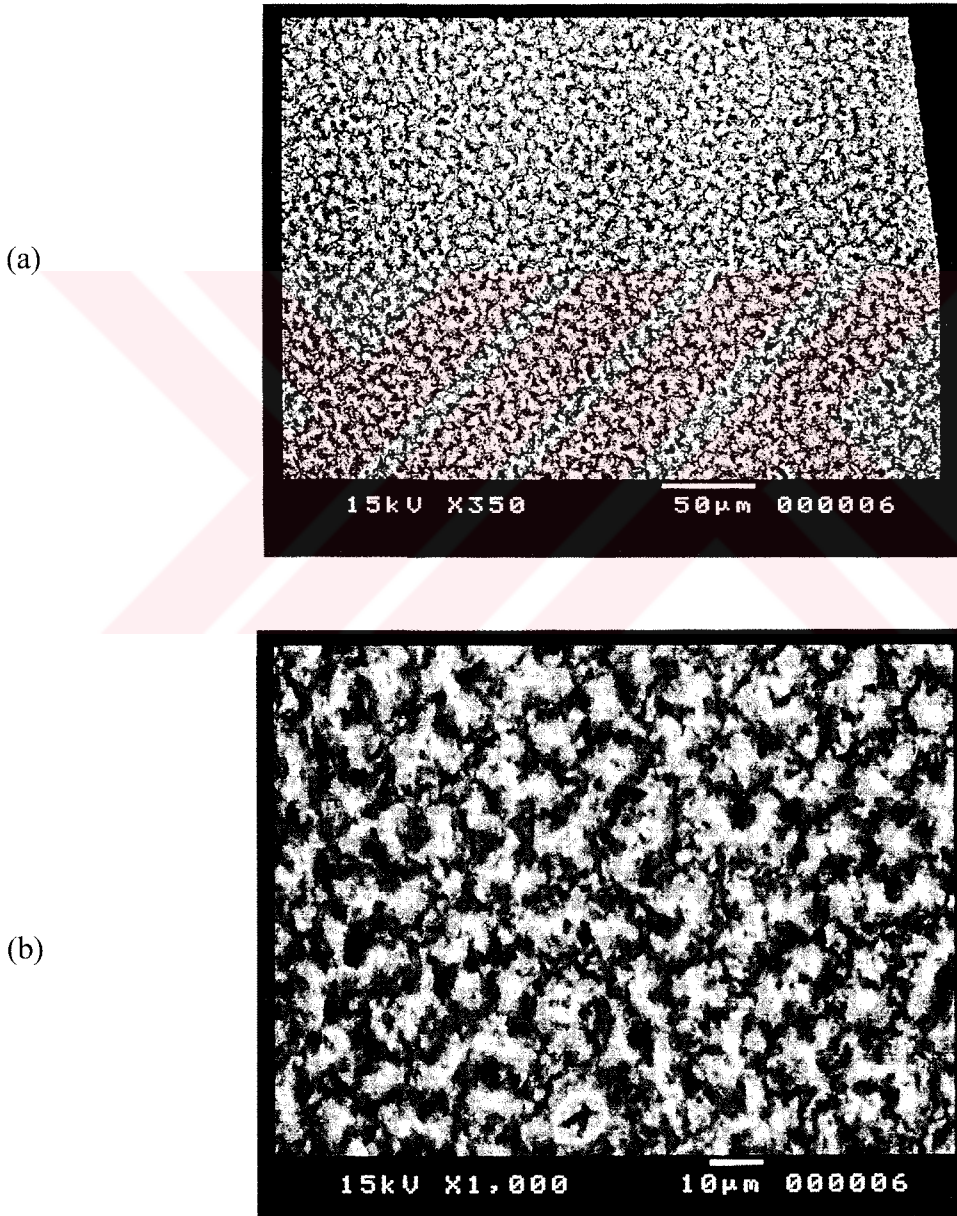


Şekil 4.1 Tek kristal silisyumun soğurma katsayısının enerjiyle değişim grafiği

Soğurma katsayısının $(\alpha^{1/2})$ karekökünün foton enerjisine ($h\nu$) bağlı değişimi çizildi ve yapılan spektrum analizinde tek kristal silisyumun indirekt band yapısı gösterdiği belirlendi. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi, eğrinin lineer kısmından alınan teğetin enerji eksenini kestiği noktanın enerjisi tek kristal silisyumun yasak band genişliğini vermektedir. Grafik üzerinde de görüldüğü üzere kristal silisyumun yasak band genişliği yaklaşık 1.08 eV olarak belirlendi.

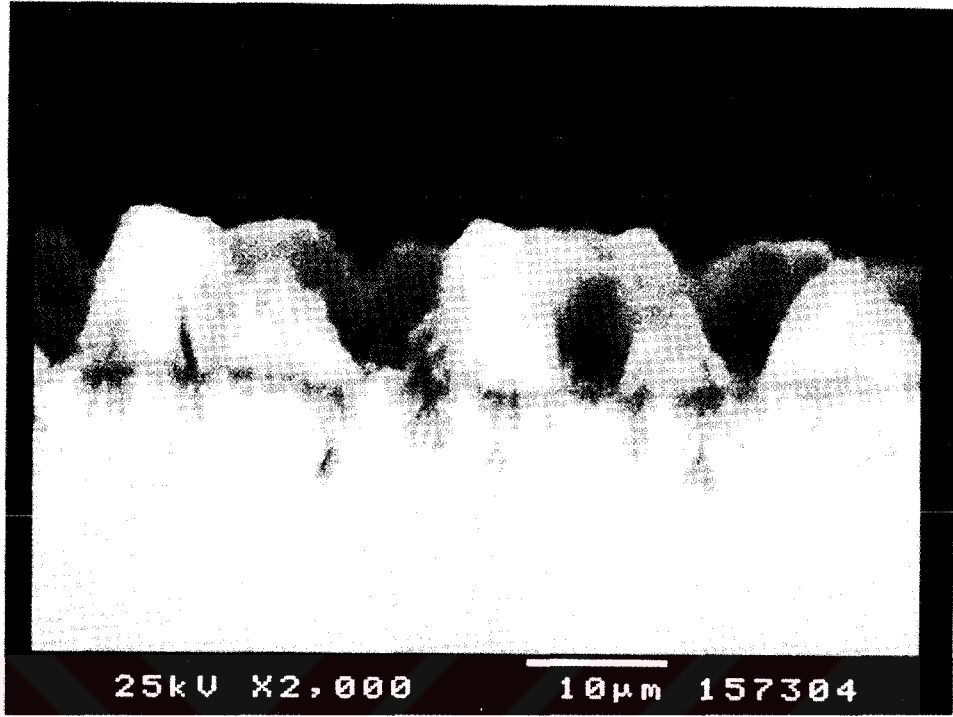
4.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin SEM Analizleri

Oda sıcaklığında yapılan yüzey analizleri (SEM) (Şekil 4.2 ve 4.3) sonucunda gözeneklerin boyutları ölçüldü ve ortalama $\text{çap } 2\text{-}5 \text{ }\mu\text{m}$ olarak belirlendi. Ayrıca Şekil 4.3’ te görüldüğü üzere aşınmanın Si altlığına yaklaştıkça azaldığı ve gözeneklerin yaklaşık olarak koni şeklini aldığı gözlemlendi.

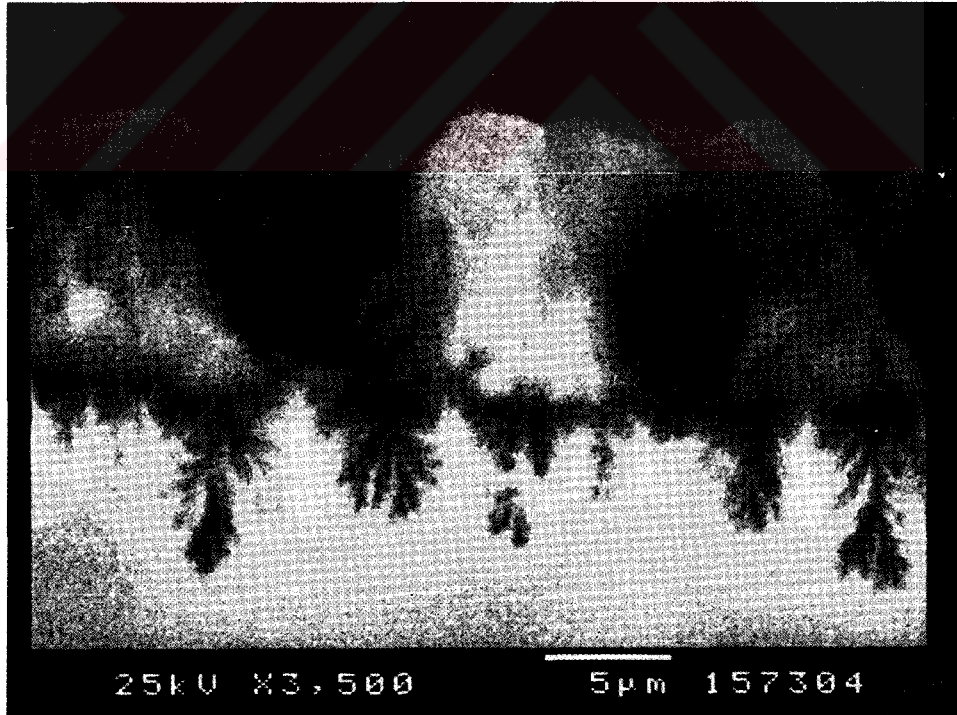


Şekil 4.2 % 78 gözenekli GS/Si yapının üstten görünüm SEM resimleri.
(a) 350, (b) 1000 kat büyütmede.

(a)



(b)



Şekil 4.3 % 78 gözenekli GS/Si yapının yandan görünüm SEM resimleri.
(a) 2000, (b) 3500 kat büyütmede.

4.3 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumları

4.3.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarının Gözenekliliğe Bağlılığı

Anodizasyon süresi değiştirilerek, sabit akım yoğunluğu (15 mA/cm^2) ve sabit aydınlatma şartları altında hazırlanan farklı gözenekliliğe sahip olan GS filmlerin optik geçirgenlik spektrumları alındı ve enerji aralığının gözeneklilik ile ilişkisi incelendi. Gözeneklilikleri %20-95 arasında değişen GS filmlerin soğurma katsayılarının foton enerjisine bağlılığı aşağıdaki formülle ifade edildiği gösterildi (Şekil 4.4)

$$\alpha^2(h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (4.1)$$

Burada, E_g , yasak band genişliği, A bir sabittir.

Bu sonuca dayanarak, GS filmlerin direkt band yapılı yarıiletken davranışı sergilediği bulundu.

Şekil 4.4a ve 4b' den de görüldüğü gibi gözeneklilikleri %25, 46, 67 ve 80 olan GS filmlerin yasak band genişlikleri sırasıyla yaklaşık olarak 1.25, 1.41, 1.85 ve 1.94 eV olarak belirlendi.

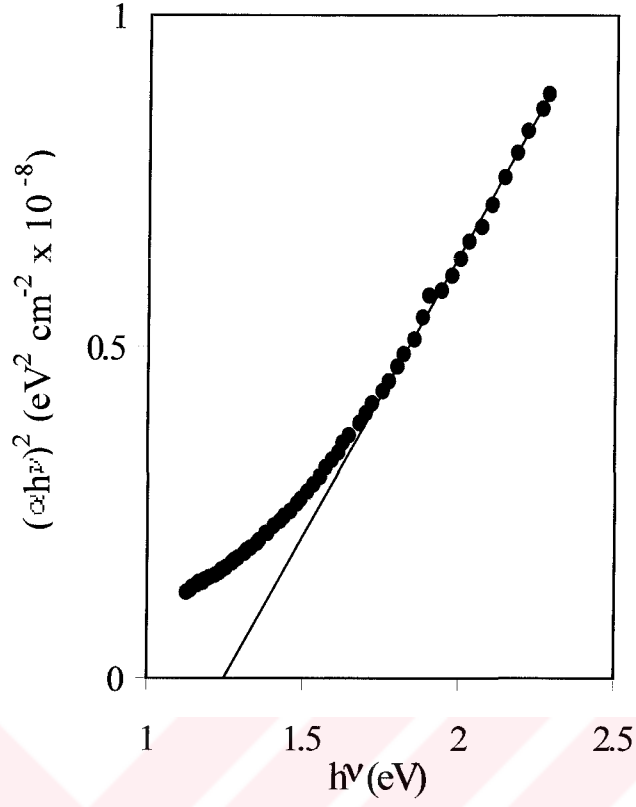
Şekil 4.5' te görüldüğü gibi, filmlerin gözenekliliğinin (%30-90) artmasıyla birlikte GS filmlerin yasak band genişliğinin lineer olarak arttığı gözlemlendi ve filmlerin gözeneklilikleri ile yasak band genişliği arasındaki ilişki,

$$E_g = 8.5 \times 10^{-3} (\%P) + 1.16 \text{ (eV)} \quad (4.2)$$

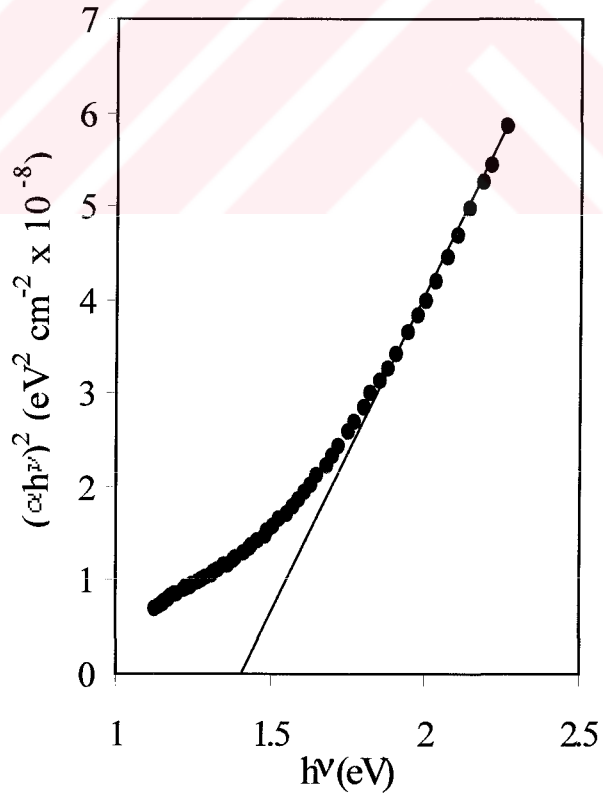
olarak hesaplandı.

Bu sonuç literatürde gözeneklilik arttıkça fotoluminesans aralığının maviye kaydığı sonuçlarıyla uyumludur (Sagnes vd., 1993, Xu vd., 1999).

(1)

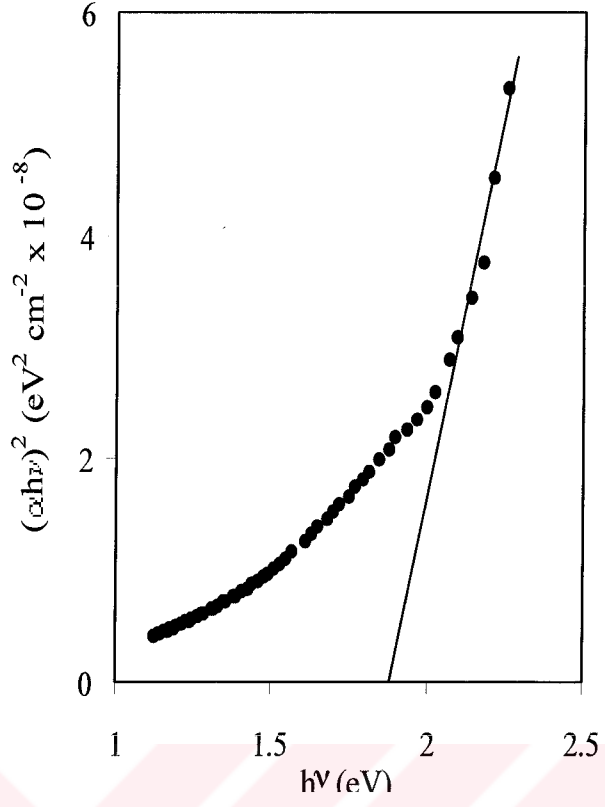


(2)

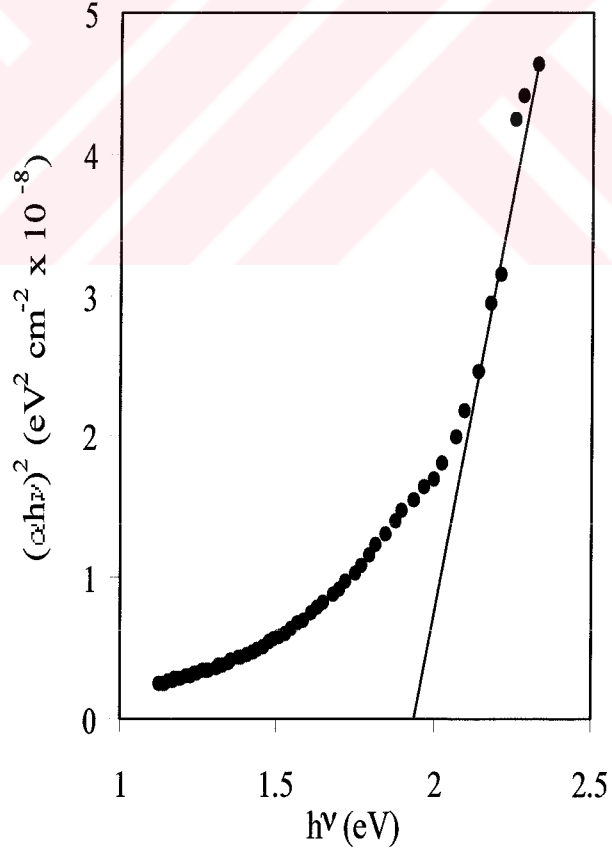


Şekil 4.4 (a) Oda şartlarında farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin soğurma katsayılarının foton enerjisiyle değişimi, (1) P= %25, (2) P= %46, (300 K, %40 RH).

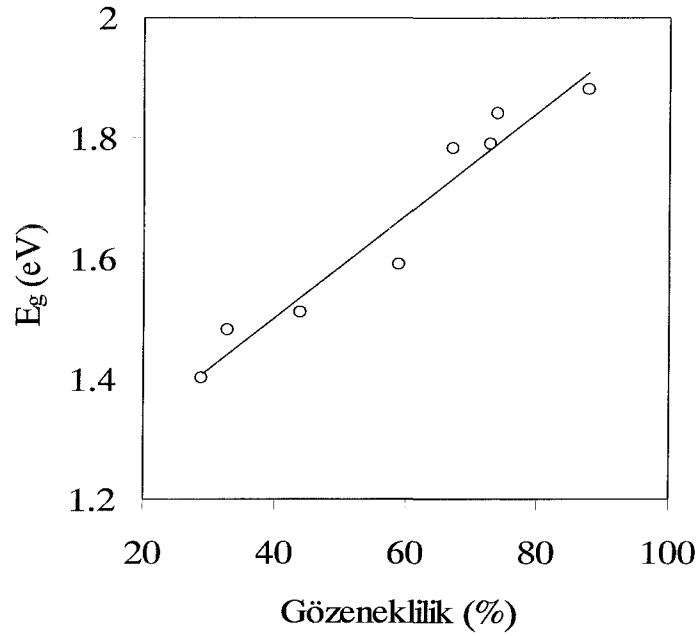
(3)



(4)



Şekil 4.4 (b) Oda şartlarında farklı gözenekliliğe sahip GS filmlerin soğurma katsayılarının foton enerjisiyle değişimi, (3) P= %67, (4) P= %80, (300 K, %40 RH).



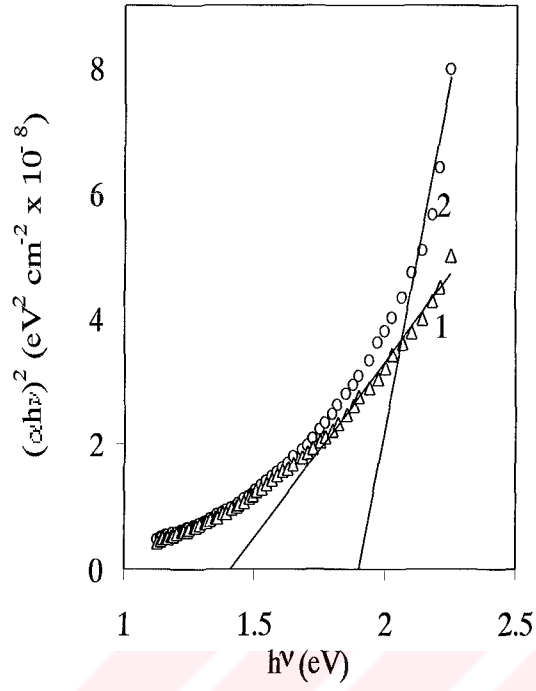
Şekil 4.5 GS filmlerin yasak band genişliğinin filmlerin gözenekliliğine bağlı olarak değişimi (%40 RH).

4.3.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarının Nemle Değişimi

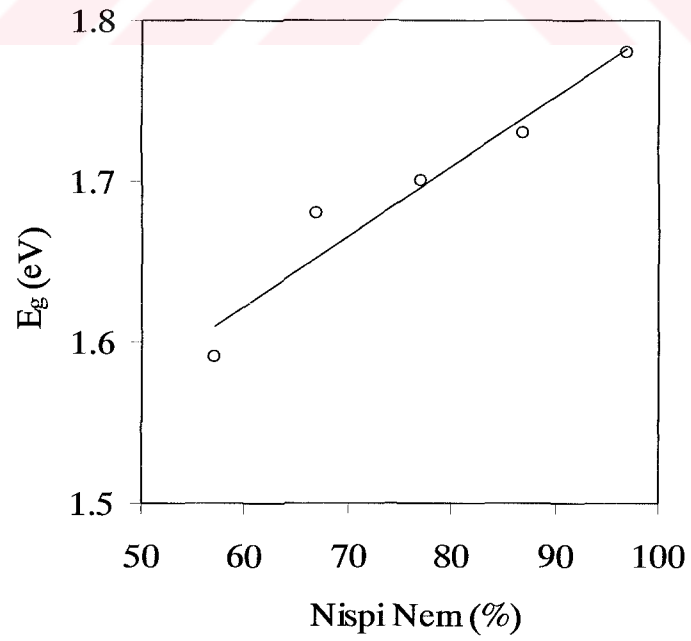
Bu çalışmada sabit gözenekliliğe sahip ($P = \%68$) filmlerin optik spektrumlarının ortamın nemliliğine bağlı değişimi incelenmiştir.

Tek anodizasyon sürecinde hazırlanmış GS film 5-6 parçaya ayrıldı ve her bir parça nem hücresinde 30 dk süreli farklı neme (%40-95 RH) tabi tutulduktan sonra yapılan optik ölçümler sonucu yasak band genişliğinin nemle değişimi incelendi. Şekil 4.6' da örnek olarak %68 gözenekli GS filmin oda ortamında ($T=300$ K, %40 RH) ve nem ortamında (%90 RH) soğurma spektrumları gösterildi. Nemliliğin artmasıyla birlikte soğurma spektrumlarında maviye kayma gözlemlendi. %90 nem ortamında GS filmin enerji aralığı (1.9 eV), oda ortamındakinden (1.6 eV) daha fazla olduğu belirlendi. Şekil 4.6' da GS filmlerin ($P=\%68$) yasak band genişliğinin neme bağlılığı sunulmaktadır. Bu sonuçlar Şekil 4.5' te görülen enerji aralığının gözeneklilikle yaklaşık lineer artışına benzerliği görülmektedir. Şekil 4.7' deki grafikten, %68 gözenekliliğe sahip GS filmlerin yasak band genişliğinin ortamın nem oranına bağlı değişimi (4.3) formülü ile gösterildi.

$$E_g = 4 \times 10^{-3} (\%RH) + 1.37 \text{ (eV)} \quad (4.3)$$



Şekil 4.6 GS filmin optik soğurma spektrumunun neme bağlı değişimi, (1) %40 RH, (2) %90 RH.



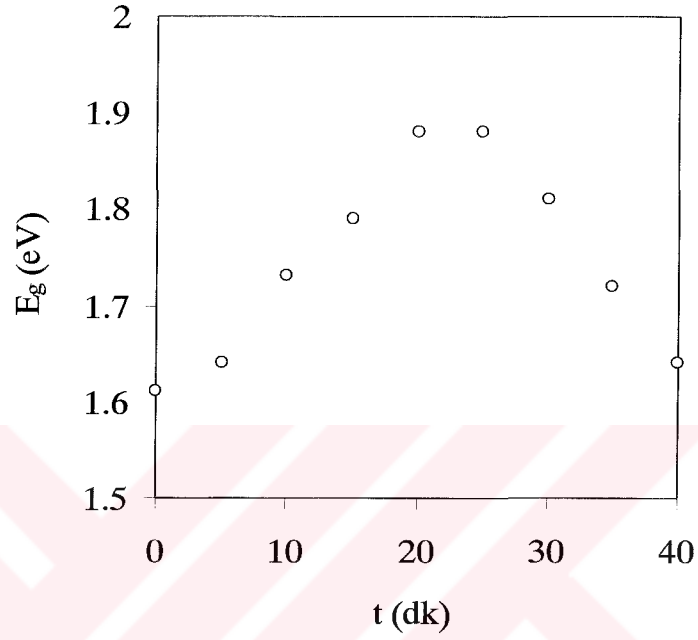
Şekil 4.7 GS filmlerin yasak band genişliğinin neme bağlı değişimi (P= %68).

GS filmlerin neme maruz kalma süresine bağlı olarak yasak band genişliği değişimini incelemek için, aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

Belirli gözenekliliğe sahip GS filmler Şekil 3.3' te görülen nem hücresinde $\Delta t=5$ dk aralıklı zaman dilimlerinde toplam 20 dk sabit (%90 RH) neme tabi tutuldu ve her 5 dakikada bir geçirgenlik spektrumları alındı. Hemen ardından devam edilen 20-25 dakika nem ortamından alınarak, oda şartlarında (%40 RH), kuruma sürecinde de her 5 dakikada bir geçirgenlik spektrumları alındı ve analiz edilerek GS filmlerin sabit nemde ve ardından kurumasi esnasında yasak band genişliği değişimi incelendi (Şekil 4.8). GS filmlerin optik soğurma spektrumları bir kez nem ortamına konulduktan sonra (20-25 dk) arttığı ve nem ortamından çıkarıldığında (yaklaşık 20-25 dk) azaldığı gözlemlendi.

Bu sonuçlara dayanarak, oda ortamında (300 K, %40 RH) GS filmlerin yasak band genişliğinin tek kristal silisyumun yasak band genişliğinden fazla olmasının nedeni, gözenekliliğin artması ile birlikte nanokristal yapının boyutlarının azalmasına bağlı olarak kuantum sınırlama modeline bağlandı. Öte yandan filmlerin yasak band genişliklerinin nemliliğe bağlı artmasını GS yüzey bağları özellikle, Si-H ve Si-O bağlarının konsantrasyonlarının değişimiyle yorumlandı. Bu sonuç, GS filmler nem ortamına yerleştirildiğinde, hidrojen ve oksijen atomlarının nem ortamından (su buharı) difüzyonu ve GS film yüzeyinde Si-H ve Si-O bağları şeklinde konumlanmasıyla açıklanabilir. Yine aynı şekilde, nem ortamından çıkarılması ile yasak band genişliğinin azalması da (Şekil 4.8) hidrojen ve oksijen atom veya moleküllerinin örnek dışına geri difüzyonu ile açıklanabilir. Nem ortamında yasak band genişliğinin artmasına oksijenden çok hidrojenin difüzyonunun sebep olduğuna inanılmaktadır (Dzhafarov ve Can 2000). Bu önerimizi dolaylı yoldan destekleyen Xu ve arkadaşları tarafından 2000 yılında yapılan çalışmada oksijen atomlarının artmasıyla birlikte GS filmlerin yasak band genişliğinin azaldığı bildirilmiştir. Dahası, GS' da hidrojenin difüzyon katsayısı oksijenin difüzyon katsayısından daha büyüktür (Dzhafarov ve Can, 2000) ve bu nedenle nem ortamında GS filmler üzerinde Si-H bağlarının konumlanması çok daha olasıdır. GS filmlerin yasak band genişliğinin artışının hidrojen uyarması modeli kabulünde yasak band genişliğinin artış oranı GS filmlerde hidrojenin difüzyon katsayısı ile belirlenmektedir. Oda sıcaklığında ve %90 nem ortamında hidrojenin difüzyon katsayısı $D \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ' dir (Abdullaev ve Dzhafarov, 1987).

Böylece, GS filmlerin yasak band genişliğinin (oda şartlarında) gözenekliliğe bağlı olarak artışı gözlenmiştir. Bu olay kuantum sınırlama modeli ile yorumlanmıştır. Bundan başka, sabit gözenekliliğe sahip filmlerin yasak band genişliğinin nem ortamında artması GS filmlerin yüzeyindeki Si-H bağlarının konsantrasyonunun artışı ile açıklanmıştır.



Şekil 4.8 %90 nemde $t=0-20$ dk ve devamında $t=20-40$ dk nem ortamından çıkarıldığında GS filmlerin yasak band genişliğinin zamana bağlı değişimi.

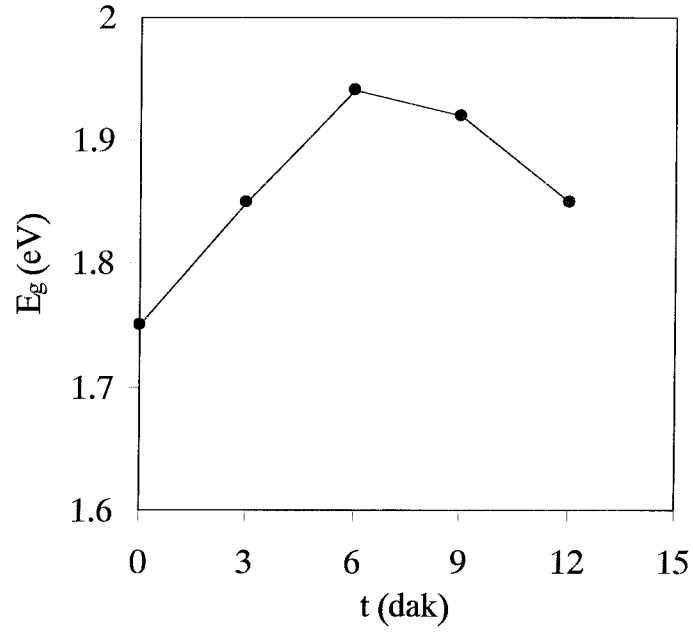
Yazdırma Tarihi: 2023/05/05 10:00:00
Yazdırma Yeri: C:\Program Files\Microsoft Office\Office\Word\Word.docx

4.3.3 Tavlamanın Gözenekli Silisyum Filmlerin Optik Spektrumlarına Etkisi

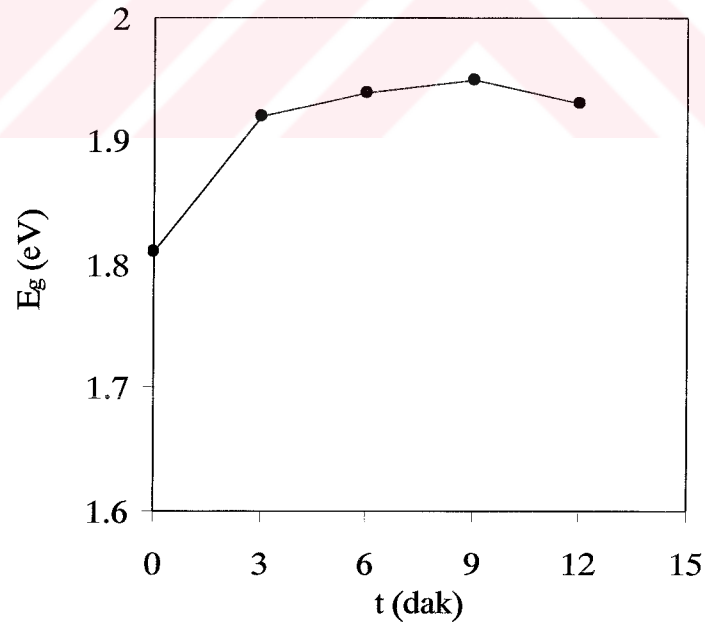
Yukarıda GS filmlerin yasak band genişliğinin nem ortamında arttığı gösterildi. Bu bölümde ise, GS filmlerin hava ortamında ve vakumda tavllanması ile yasak band genişliğinin değişimine etkisi incelenmiştir. Bu incelemeler için aşağıdaki deneyler yapılmıştır.

Tek anodizasyon sürecinde hazırlanan GS film 5-6 parçaya ayrıldı ve her bir parça 100°C' de hava ortamında ve vakumda 3 dk süreli tavlama tabi tutulduktan sonra yapılan optik ölçümler sonucu yasak band genişliğinin hava ortamında ve vakumda tavlama zamanına göre değişimi incelendi. Havada 100 °C' de tavlanan GS filmlerin yasak band genişliğinin zamanla ilk 6 dk'ya kadar arttığı ve sonra azaldığı (Şekil 4.9) gözlemlendi (P= %69). Vakumda tavlama sonuçlarına göre ise, yasak band genişliğinin arttığı ve sonra sabitlendiği (Şekil 4.10) gözlemlendi (P= %75).

GS filmlerin hava ortamında ve vakumda tavlama süreleriyle yasak band genişliğinin arttığı hava ortamında tavlama artışın vakumda tavlama göre daha keskin olduğu ancak hava ortamında tavlama maksimum yasak band genişliğine tavlamanın 6. dakikasında ulaştığı, tavlama devam edildiğinde yasak band genişliğinin azaldığı gözlemlendi. Vakumda ise tavlama yasak band genişliğinin önce arttığı sonrasında sabitlendiği gözlemlendi. Bu sonuçlar doğrultusunda, yasak band genişliğinin doyuma ulaşması GS filmlerin oksitlenmesi ile yorumlanmasıyla birlikte Ömür, 1999 yılında hazırladığı tez çalışmasında ele aldığı GS filmlerin fotoluminesans spektrumlarının tavlama ile değişimi sonuçları ile uyumludur. Bu çalışmada sıcaklığın artışı fotoluminesans şiddetinin azalmasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 4.9 GS filmlerin ($P= \%69$) yasak band genişliğinin hava ortamında tavlama zamanına bağlı değişimi ($T=100^{\circ}\text{C}$).

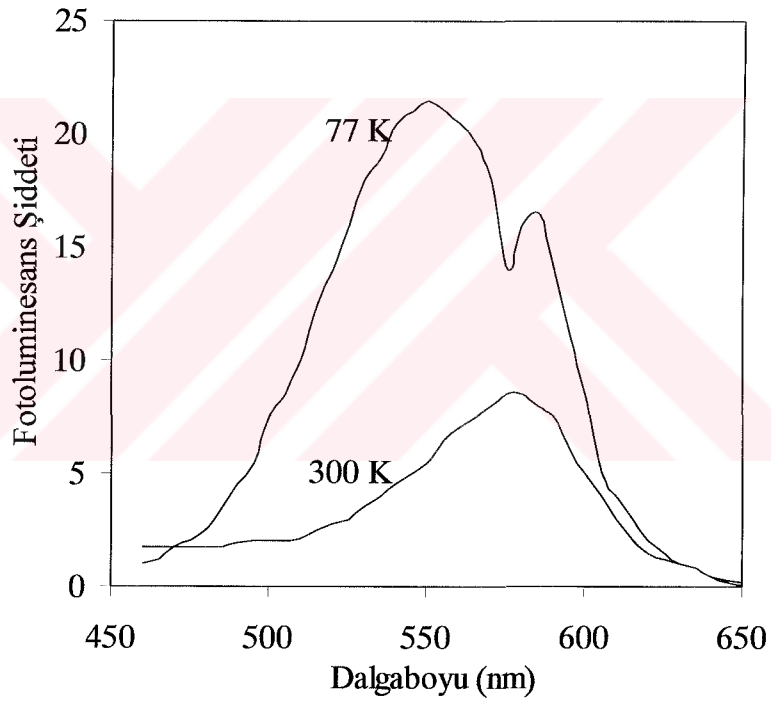


Şekil 4.10 GS filmlerin ($P= \%75$) yasak band genişliğinin vakumda tavlama zamanına bağlı değişimi ($T=100^{\circ}\text{C}$).

4.4 Gözenekli Silisyum Filmlerin Fotolüminesans Spektrumları

GS filmlerin fotolüminesans şiddetlerinin dalga boyuna bağlı değişimlerinin farklı sıcaklıklarda alınan spektrumları Şekil 4.11’ de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, sıcaklığın artmasıyla turuncu fotolüminesans şiddetinin azaldığı görülmektedir.

Ayrıca lüminesans spektrumunda görülen omuz meydana gelmesi, uyarılmış elektronun geri dönerken rekombinasyon esnasında katkı veya kusur seviyelerine düşmesinden sonra valans bandına inmesiyle yorumlanabilir.



Şekil 4.11 GS filmin fotolüminesans spektrumlarının sıcaklıkla değişimi.

4.5 Gözenekli Silisyum Filmlerin Elektriksel Özellikleri

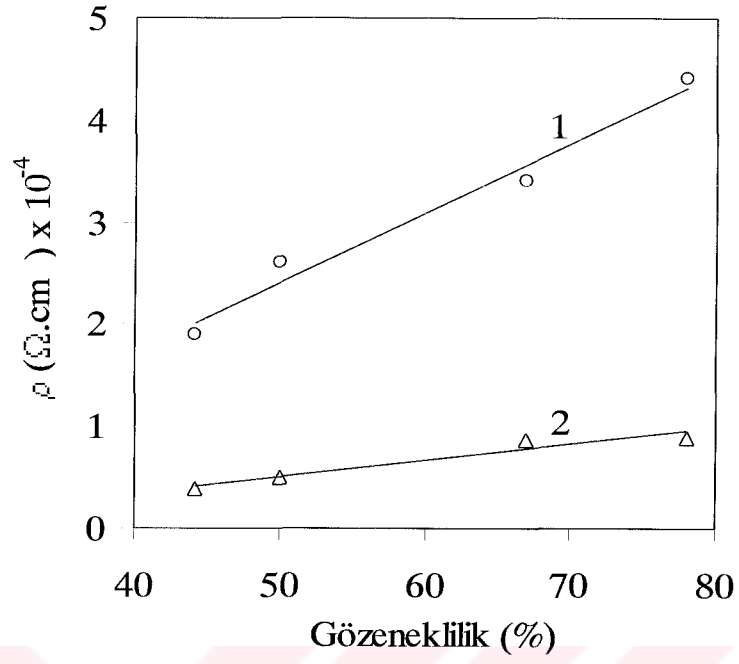
4.5.1 Gözenekli Silisyum Filmlerin Özdirencinin Gözenekliliğe Bağlı Değişimi

Bu çalışmada GS filmlerin gözeneklere paralel ve dik yönde özdirençleri ölçüldü. Bu ölçümler için aşağıdaki deneyler yapıldı.

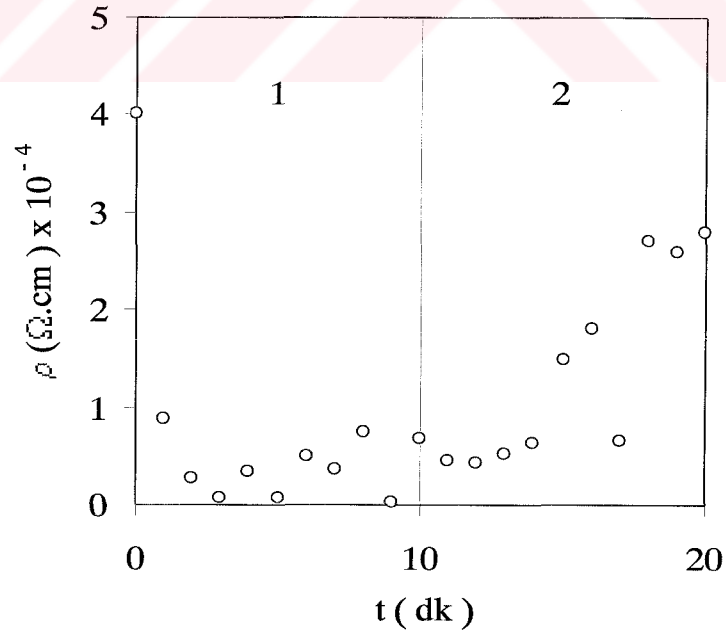
Tek kristal silisyumun yüzeyinden elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle gözenekli silisyum tabaka elde edildi ve elektro-parlatma ile Si altlıktan ayrıldı. Değişik anodizasyon şartları ile elde edilen filmlerin kalınlıkları 5-15 μ m aralığında ve gözeneklilikleri ise %20-95 aralığında olduğu ağırlık ölçüm yöntemiyle belirlendi. GS filmlerin özdirençleri Şekil 3.6' daki sistem kullanılarak 2×10^4 - 4×10^4 Ω cm olarak belirlendi. Termal prob yöntemiyle yapılan tip ölçümlerinde GS filmlerin p-tipi olduğu belirlendi. İki yönde yapılan özdirenç ölçümlerinde ise gözeneklere paralel yönelimdeki özdirencin ($\rho_{||}$) dikey yönelimde özdirençten ($\rho_{\perp}$) yaklaşık 2 kat daha düşük olduğu belirlendi. Bu sonuç, gözenekleri çevreleyen nm-boyutlu silisyum tabanlı yapıların birbirine paralel bağlanmaları durumunda toplam direncin paralel bağlı her bir yapının en küçük dirençli olanından daha küçük olacağı ve yine bu yapıların seri bağlanması ile ise toplam direncin tüm yapıların dirençleri toplamına eşit olacağı durumları ile açıklanabilir. Şekil 4.12' de GS filmlerin özdirencinin gözeneklilikle değişim grafiği verilmiştir. Gözenekliliğin artmasıyla birlikte her iki yönde de özdirencin artmakta olduğu görülmektedir. GS filmlerin özdirencinin gözenekliliğe bağlı değişimi diğer taraftan Şekil 4.5' te görülen grafik ile ilişkili olarak yasak band genişliğiyle de aynı bağlılığı göstermektedir.

4.5.2 Gözenekli Silisyum Filmlerin Özdirencinin Nemliliğe Bağlı Değişimi

Şekil 4.13' te %64 gözenekliliğe sahip GS filmin, ilk 10 dakika sabit (%90 RH) nem ortamında tutulduktan sonra oda ortamına çıkarıldığında (11-20 dk) gözeneklere dik doğrultuda özdirencinin ($\rho_{\perp}$) zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi nem ortamında düşen direnç, GS film nem ortamından çıkarıldığında artmaktadır. Özdirencin nem etkisiyle düşmesi gözenekler boyunca hidrojenin difüzyonuyla hidrojen iyonlarının artmasına bağlı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 4.12 GS filmlerinin öz direncin gözeneklilikle değişimi, (%40 RH): (1) Gözeneklere dik yönde ($\rho_{\perp}$), (2) Gözeneklere paralel yönde ($\rho_{\parallel}$).



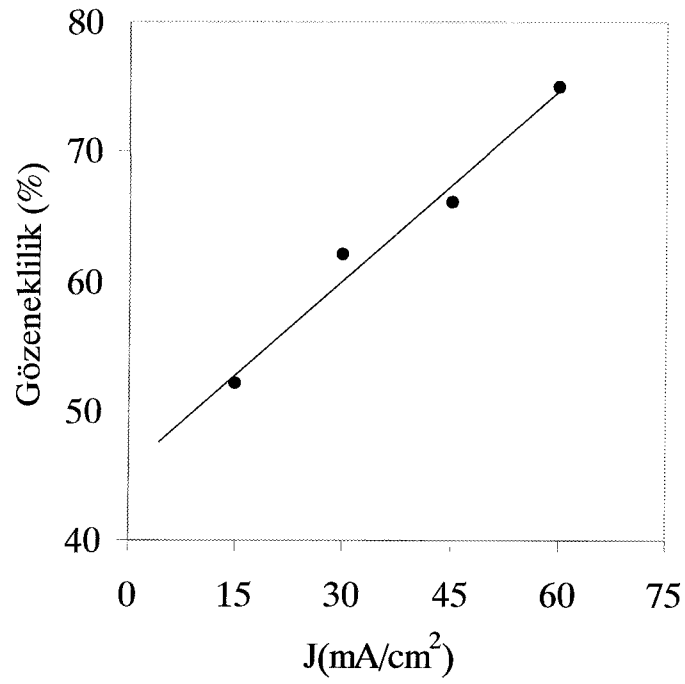
Şekil 4.13 GS filmin ($P=64\%$) öz direncinin değişimi: (1) nem ortamına (% 90 RH) yerleştirildiğinde ($t=0-10$ dk), (2) nem ortamından çıkarıldığında ($t=12-20$ dk).

4.6 Anodizasyon Şartlarının Gözenekli Silisyum Filmlerin Kalınlık ve Gözenekliliğine Etkisi

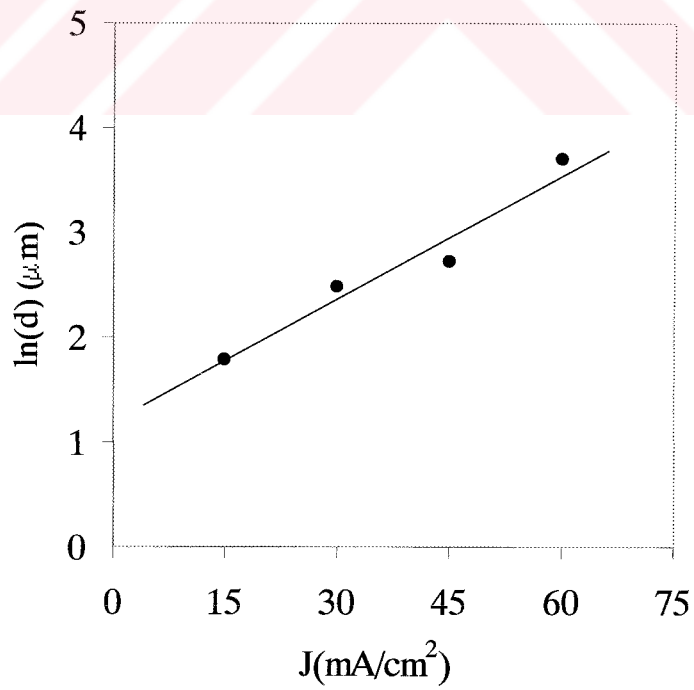
Bu çalışmada ayrıca, GS filmlerin hazırlanmasında elektrokimyasal anodizasyon akım yoğunluğu ve aydınlanma parametreleri değiştirilerek filmlerin gözenekliliklerinin ve kalınlıklarının bu parametrelerle nasıl değiştiği incelendi. Bu incelemeler için aşağıdaki deneyler yapıldı.

- (a) Sabit anodizasyon süresi ($t=25$ dk) ve sabit aydınlatma altında ($E=4000$ lux), akım yoğunluğu değiştirilerek ($J=15-60$ mA/cm²) hazırlanan GS filmlerin akım yoğunluğuna bağlı gözeneklilik ve kalınlık değişimi incelendi. GS filmlerin gözenekliliğinin anodizasyon akım yoğunluğu değişimine bağlılığı Şekil 4.14' te görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi akım yoğunluğu arttıkça ($J=15-60$ mA/cm²) gözeneklilik lineer olarak artmaktadır ($P=\% 45-75$). Akım yoğunluğu GS film kalınlığı ilişkisi Şekil 4.15' te verilmektedir. Anodizasyon akım yoğunluğu arttıkça ($J=15-60$ mA/cm²), GS filmlerin kalınlığı ($d=5-45$ µm) eksponansiyel olarak artmaktadır.
- (b) Anodizasyon şartlarından akım yoğunluğu (15 mA/cm²) ve anodizasyon süresi sabit tutulup ($t=30$ dk), ışık kaynağının Si örneğe olan uzaklığı değiştirilerek aydınlanma şiddeti değiştirildi ($E=4000-8000$ lux) ve kalınlık ve gözenekliliğin aydınlanmaya bağlılığı incelendi. GS filmlerin gözenekliliği anodizasyon esnasında verilen aydınlanma değişimine bağlılığı Şekil 4.16' da görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi aydınlanma arttıkça gözeneklilik ($P=\% 40-90$) lineer olarak artmaktadır. Anodizasyon süreci aydınlanması ile GS film kalınlığı ilişkisi Şekil 4.17' de verilmektedir. Aydınlatma arttıkça GS filmlerin kalınlığı lineer olarak ($d=8-16$ µm) arttığı gözlenmiştir.

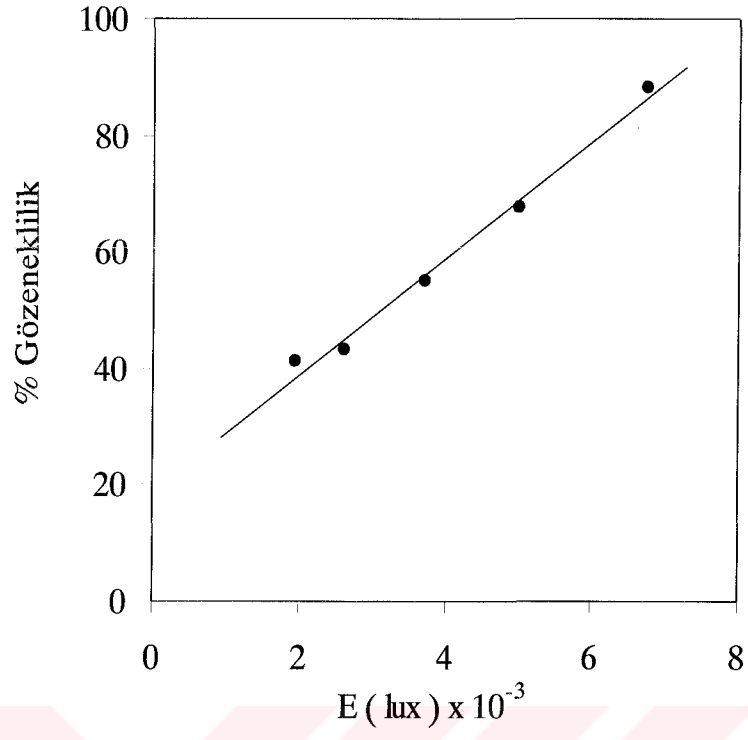
Bu sonuçlar aydınlanmanın artmasıyla birlikte gözeneklilik ve kalınlığın artmasını delik konsantrasyonunun artmasıyla yorumlandı



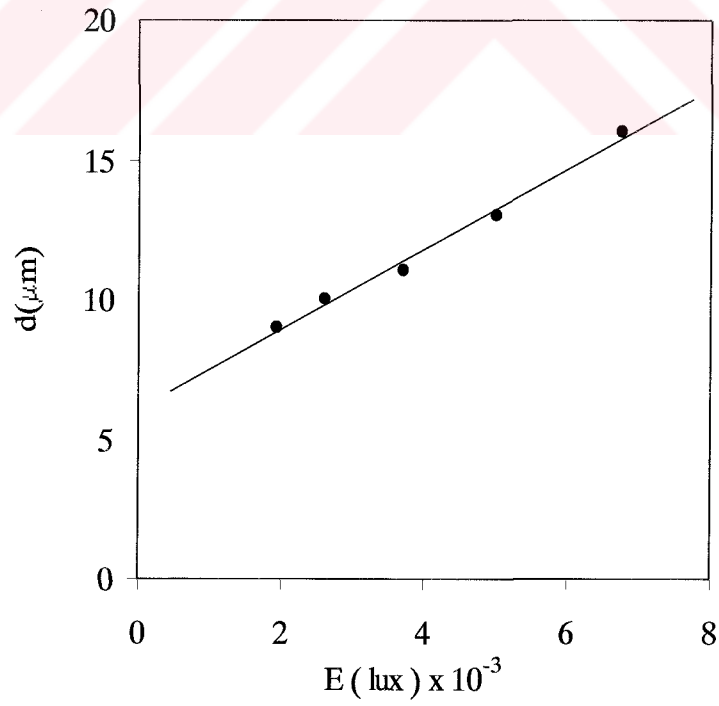
Şekil 4.14 GS filmlerin gözenekliliklerinin anodizasyon süreci akım yoğunluğuna bağlı değişimi.



Şekil 4.15 GS filmlerin kalınlığının anodizasyon süreci akım yoğunluğuna bağlı değişimi.



Şekil 4.16 GS filmlerin gözenekliliğinin anodizasyon süreci aydınlanma ile değişimi.



Şekil 4.17 GS filmlerin kalınlığının anodizasyon süreci aydınlanma ile değişimi.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek kristal silisyum altlıklar üzerinde elektrokimyasal anodizasyon yöntemiyle aşındırılması sonucunda GS elde edildi. Altlıklardan ayrılmış GS ince filmlerin optik soğurma spektrumları, luminesans spektrumları ve elektriksel karakteristikleri ortamın bağıl nemine ve filmlerin gözeneklilik derecelerine bağlı olarak değişimi incelendi.

Kristal Si' un öz direnci $\rho = 1.3 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}$, iletkenlik tipi n olarak ölçüldü ve yük taşıyıcılarının konsantrasyonu, $n = 2.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ve mobiliteleri $\mu = 165.4 \text{cm}^2/\text{V.s}$ olarak hesaplandı. Değişik anodizasyon şartları ile elde edilen GS filmlerin kalınlıkları 5-15 μm aralığında olduğu ölçüldü ve gözeneklilikleri ise %20-95 aralığında olduğu ağırlık ölçüm yöntemiyle belirlendi. GS filmlerin öz dirençleri $2 \times 10^4 - 4 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ olarak ölçüldü.

GS filmlere yapılan SEM analizleri literatürle benzerlik gösterdiği ve n-tpi Si' dan elde edilen GS film morfolojisini sergilediği görüldü. Ayrıca gözeneklerin ortalama çaplarının 2-5 μm olarak belirlendi. Şekil 4.3' te görüldüğü üzere aşınmanın Si altlığına yaklaştıkça azaldığı ve gözeneklerin yaklaşık olarak koni şeklini aldığı gözlemlendi.

Çalışmadan aşağıdaki esas sonuçlar alınmıştır.

1. GS filmlerin optik soğurma spektrumlarından normal oda şartlarında ($T=300 \text{ K}$, %40 RH) direkt bantlı yarıiletken davranışı sergiledikleri

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

gösterildi (Şekil 4.4 a, b).

2. Akım yoğunluğu ($15 \text{mA}/\text{cm}^2$) ve aydınlanmanın (4000 lux) sabit, anodizasyon süresi değiştirilerek yapılan farklı gözenekliliğe sahip, GS filmlerin yasak band genişlikleri optik spektrumları kullanılarak belirlendi. Normal oda şartlarında ($T=300 \text{ K}$, %40 RH) filmlerin gözeneklilikleri arttıkça (%40-90) yasak band genişlikleri lineer olarak

$$E_g = 8.5 \times 10^{-3}(\%P) + 1.16 \text{ (eV)}$$

artmaktadır (1.4–1.9 eV), (Şekil 4.5). Bu sonucu Canham ve arkadaşlarının 1990 yılında

sunduğu kuantum sınırlama modeline göre gözeneklilik arttıkça nanokristal boyutun azalması ile yorumlamak mümkündür.

3. Sabit gözenekliliğe sahip ($P=0.68$) GS filmlerin farklı nem ortamlarında tutulmalarından sonra, optik soğurma spektrumlarının maviye kayması gözlemlendi (Şekil 4.6). Bağıl nemin artmasıyla (% 55-95) birlikte filmlerin yasak band genişliklerinin

$$E_g = 4 \times 10^{-3} (\%RH) + 1.37 \text{ (eV)}$$

arttığı (1.6-1.8 eV) gözlemlendi (Şekil 4.7). Bu sonunun filmlerin gözeneklilikleri ile yasak band genişliği değişimine benzerliği belirlendi.

4. GS filmlerin sabit nem ortamına konulduklarında ve tekrar oda ortamına çıkarıldıklarında yasak band genişliklerinin neme maruz kalma ve nem ortamından oda şartlarına çıkarıldığında zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Sabit gözenekliliğe sahip ($P=0.68$) GS filmlerin sabit nem (%90 RH) ortamında (0-20 dk) tutulduktan sonra (25-40 dk) aralığında oda ortamında tutulması süreçlerinde yapılan deneylerde nem ortamında ilk 20 dk filmin yasak band genişliğinin yükseldiği (1.6-1.9 eV) ve ardından normal oda ortamına çıkarıldıklarında (25-40 dk) yasak band genişliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Bu hidrojen ve oksijen atomlarının nem ortamından (su buharı) difüzyonu ve GS filmlerin yüzeyinde Si-H ve Si-O bağları şeklinde konumlanmasıyla açıklanabilir. Yine aynı şekilde, filmlerin nem ortamından çıkarılması ile yasak band genişliklerinin azalması da hidrojen ve oksijen atom veya moleküllerinin örnek dışına geri difüzyonu ile açıklanabilir. Biz nem ortamında yasak band genişliğinin artmasına oksijenden çok hidrojenin difüzyonunun sebep olduğuna inanmaktayız (Dzhafarov ve Can, 2000). Dahası, GS' da hidrojenin difüzyon katsayısı oksijenin difüzyon katsayısından daha büyüktür ve bu nedenle nem ortamında GS filmler üzerinde Si-H bağlarının konumlanması çok daha olasıdır. GS filmlerin yasak band genişliğinin artışının hidrojen uyarması modeli kabulünde yasak band genişliğinin artış oranı GS filmlerde hidrojenin difüzyon katsayısı ile belirlenir.

5. GS filmlerin farklı ortamlarda (hava ortamı ve vakum) tavlama süreçlerinin optik soğurma spektrumlarına etkisi incelemelerinde filmlerin yasak band genişliğinin her iki ortamda da tavlama ile ($T=100^\circ\text{C}$) arttığı, hava ortamında tavlama artışı vakumda tavlama göre daha keskin olduğu, maksimum yasak band genişliğine tavlamanın 6. dakikasında ulaştığı ve tavlama devam edildiğinde yasak band genişliğinin azaldığı gözlemlendi (Şekil 4.9). Vakumda

ise tavlama ile yasak band genişliğinin önce arttığı sonrasında sabitlendiği belirlendi (Şekil 4.10). Bu sonuçlar doğrultusunda, yasak band genişliğinin doyuma ulaşması GS filmlerin oksitlenmesi ile yorumlanılabilir.

6. Silisyum altlıktan ayrılan GS filmlere termal prob yöntemiyle yapılan tip ölçümlerinde GS filmlerin p-tipi olduğu belirlendi. Gözeneklere paralel ve dik yönde yapılan ölçümlerde, GS filmlerin öz dirençleri $2 \times 10^4 - 4 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ olarak belirlendi. Gözeneklere paralel yönelimdeki öz direncin (ρ_u) dikey yönelimde öz dirençten ($\rho_\perp$) yaklaşık 2 kat daha düşük olduğu belirlendi. Bu sonuç, gözenekleri çevreleyen nm-boyutlu silisyum tabanlı yapıların birbirine paralel bağlanmaları durumunda toplam direncin paralel bağlı herbir yapının en küçük dirençli olanından daha küçük olacağı ve yine bu yapıların seri bağlanması ile ise toplam direncin tüm yapıların dirençleri toplamına eşit olacağı durumları ile açıklanabilir (Şekil 4.12). Gözenekliliğin artmasıyla birlikte her iki yönde de öz direncin arttığı belirlendi. GS filmlerin öz direncinin gözenekliliğe bağlı değişimi diğer taraftan Şekil 4.5' te görülen grafik ile ilişkili olarak yasak band genişliğiyle de aynı bağlılığı göstermektedir.

7. GS filmlerin nem ortamına yerleştirildiklerinde ve ortamdan uzaklaştırıldıklarında zamana bağlı direnç değişimi incelendi. Sabit gözenekliliğe sahip ($P=64\%$) GS filmlerin sabit nem ortamına ($90\% \text{ RH}$) yerleştirildiklerinde (0-10 dk) öz dirençlerinin arttığı ve oda ortamına (12-20 dk) çıkarıldıklarında ise tekrar yükseldiği gözlemlendi (Şekil 4.13). Öz direncin nem etkisiyle düşmesi gözenekler boyunca hidrojenin difüzyonuyla hidrojen iyonlarının artmasına bağlı olarak açıklandı.

8. GS filmlerin hazırlanma şartları değiştirilerek yapılan deneyler sonucunda, anodizasyon süresinin (30dk) ve aydınlanmanın (4000 lux) sabit, akım yoğunluğu değiştirilerek ($J=15-60 \text{ mA/cm}^2$) hazırlanan GS filmlerinde akım yoğunluğu arttıkça gözenekliliğin lineer olarak arttığı ($P=50-75\%$) gözlemlendi (Şekil 4.14). Yine akım yoğunluğu artışının GS film kalınlığını eksponansiyel olarak arttırdığı (5-40 μm) sonucuna ulaşıldı (Şekil 4.15). Sabit anodizasyon süresi (35dk) ve sabit akım yoğunluğunda (15 mA/cm^2), aydınlanmanın değiştirilmesi (4000-8000 lux) ile yapılan GS filmlerin gözeneklilik ($P=40-90\%$) ve kalınlıklarının ($d=8-16 \mu\text{m}$) aydınlanma şiddeti arttıkça lineer olarak arttığı gözlemlendi (Şekil 4.16,17). Bu sonucu, aydınlanmanın artmasıyla birlikte gözeneklilik ve kalınlığın artmasını delik konsantrasyonunun artmasıyla yorumlamak mümkündür.

KAYNAKLAR

- Abdullaev, G.B. ve Dzhaferov, T.D., (1987), Atomic Diffusion in Semiconductor Structures, Harwood Academic Publishers, New York.
- Beale, M.I.J., Benjamin, J.D., Uren, M.J., Chew, N.G. ve Cullis, A.G., (1985), "An Experimental and Theoretical Study of The Formation and Microstructure of Porous Silicon", J. Cryst. Growth, 73(3): 622-636.
- Bisi, O., Ossicini, S., Pavesi, L., (2000), Surface Science Reports, 38: 1-126.
- Brandt, M.S., Fuchs, H.D., Stutzman, M., Weber, J., Carolona, M., (1982), Solid State Commun., 81: 307.
- Caferov, T., (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Caferov, T., (2000), Yarıiletken Elektronik, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Canham, L.T., (1990), "Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers", Appl. Phys. Lett., 57(10): 1046-1048.
- Chan, M.H., So, S.K. ve Cheah, K. W., (1996), "Optical Absorption of Free-Standing Porous Silicon Films", J. Appl. Phys., 79(6): 3273-3275.
- Chen, C.H., Chen, Y.F., (1999), Solid State Commun., 111: 681-685.
- Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., (1997), "Porous Silicon: From Luminescence to LEDs", Physics Today. 50(1): 24-31.
- Dzhaferov, T.D. ve Can, B., (2000), J. Mater. Sci. Lett., 19: 287.
- Dzhaferov, T.D., Oruc C. ve Aydin, S., (7 February 2004), "Humidity-Voltaic Characteristics of Au-Porous Silicon Interfaces", J. Phys. D: Appl. Phys., 37, 3: 404-408.
- Dzhaferov, T.D., Aydin, 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.
- 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.
- Dzhaferov, T.D., Cingi, E., Oruc, C. ve Aydin, S., "Optical Properties of Porous Silicon Films", Turkish Physical Society, Proc. of 21 Physics Conference, September 11-14, 2002, Isparta.

John, G.C. ve Singh, V.A., (1995a), "Porous Silicon: Theoretical Studies", Physics Reports, 263: 93-151.

Joshi, A., (1995), MS report, IIT Kanpur, India.

Kanemitsu, Y., (1995), "Light Emission From Porous Silicon and Related Materials", Physics Reports, 263: 1-91.

Kimura, Y., Kondo, Y., Niwano, M., (2001), Appl., Surface Sci., 175-176: 157-162.

Koch, F., Petrova, V., Muschick, T., Nikolov, A., Gavrilenko, V., (1993), Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 283: 197.

Lehmann, V. ve Gösele, U., (1991), "Porous Silicon Formation A Quantum Wire Effects", Appl. Phys. Lett., 58: 856-858.

Noguchi, N. Ve Suemune, I., (1993), "Luminescence Silicon Synthesized by Visible Light Irradiation", Appl. Phys. Lett., 62(12):1429-1431.

Ömür, B.C., (1999), "Gözenekli Silisyumun Elektriksel ve Optik Özellikleri", İstanbul.

Öztemel, S. (1999), "Metal-GS Eklemlerin Elektriksel Özellikleri", İstanbul.

Palma-Martin, R.J., Vazquez, L., Herrero et. al., (2001), Optical Materials, 17: 75-78.

Prokes, S.M., Glembocki, Bermudes, V.M. ve Kaplan, R., (1992), Phys. Rev., B45:13788.

Qin, G.G. ve Jie, Y.Q., (1993) Solid State Commun., 86: 559.

Rotaru, C., Tomozeiu, N., Craciun, G., (1999), J. of Molecular Structure, 480-481: 293-296.

Sagnes, I., Halimaoui, A., Vicent, G., Badoz, P.A., (1993), Appl. Phys. Lett., 62(10): 1155.

Tsai, C., et. al., (1991), Appl. Phys. Lett., 59:2815.

Tsai, C., et. al., (1992), Appl. Phys. Lett., 60:1700.

Uhlir, A., (1956), "Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon", Bell System Tech. J., 35:333-347.

Xu, D., Guo, G., Gui, L., Tang, Y., Zhang, B.R. ve Qin, G.G., (1999), J. Phys. Chem B, 103:5468-5471.

Xu, D., Guo, G., Gui, L., Tang, Y., Qin, G.G., (2000), Pure Appl. Chem. 72: 237.

Xu, Z. Y., Gal, M., Gross, M., (1992), Appl. Phys. Lett. 60, 1375.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

[2] www.webelements.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	13.05.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992-1995	Bayrampaşa Tuna Lisesi
Lisans	1995-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

2001-Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
-------------------	---