

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84956

GÖZENEKLİ SİLİSYUMUN ELEKTRİKSEL VE
OPTİK ÖZELLİKLERİ

Birsel CAN ÖMÜR

F.B.E.Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan

84956

DOKTORA TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
MERKEZİ

Tez Savunma Tarihi : 24 Şubat 1999
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yani SKARLATOS (İÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Gülen AKTAŞ (BÜ)
: Prof. Dr. Çetin ARIKAN (İÜ)

Yani Skarlatos
Gülen Aktaş
Çetin Arıkan

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Yarıiletkenlerin Lüminesansı	3
1.2.1 Lüminesans türleri	3
1.2.2 İletkenlik bandı - valans bandı ve band - katkı seviyeleri geçişlerinde rekombinasyon	6
1.3 Tek Kristalli Silisyumun Özellikleri	9
1.4 Gözenekli Silisyum.....	12
1.4.1 Gözenekli silisyumun yapısı	15
1.4.2 Gözenekli silisyumun büyütülme yöntemleri	18
1.4.3 Gözenekli silisyum büyütme mekanizmaları	22
a) Beale modeli	22
b) Sınırlı yayılma modeli	23
c) Kuantum sınırlama modeli	25
1.4.4 Gözenekli silisyumda lüminesans	30
1.5 Schottky Engelleri ve Heteroeklemler	34
1.5.1 Metal-yarıiletken engelleri	34
1.5.2 Heteroeklemler	40
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
2.1 Gözenekli Silisyumun Yapılması	42
2.2 Gözenekli Silisyum İnce Filmlerin Elde Edilmesi	43
2.3 Elektriksel Ölçümler	44
2.4 Fotolüminesans Spektrumlarının İncelenmesi	46
2.5 Optik Spektrumlarının İncelenmesi	47
2.5.1 Filmlerin yansıma ve soğurma katsayılarının analizi	47
2.5.2 Filmlerin soğurma katsayılarının tavlamaaya bağlı değişim ölçümleri	50
2.6 Elektron Mikroskobu İncelemeleri	50
3. BULGULAR ve TARTIŞMA	52
3.1 Gözenekli Silisyumun Fotolüminesans Spektrumları	52
3.2 Gözenekli Silisyumun Optik Spektrumlarının İncelenmesi	56

3.3	Gözenekli Silisyum Yapıların Elektriksel Özellikleri	70
3.3.1	Gözenekli silisyumun öz direncinin incelenmesi	70
3.3.2	Al-GS-Si yapıların akım-gerilim karakteristikleri	71
4.	SONUÇLAR	76
	KAYNAKLAR	79
	ÖZGEÇMİŞ	83



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	$h\nu > E_g$ için fotonun optik soğurulması (a) Foton soğurulması sırasında elektron-boşluk çifti yaratılır. (b) Uyarılmış elektron saçılmalarla örgüye enerji verir. (c) Elektron valans bandındaki bir boşlukla birleşir 4
Şekil 1.2	Fotoluminesansta elektronlar için tuzaklama seviyesini içeren uyarılma ve rekombinasyon mekanizmaları 4
Şekil 1.3	Işınımlı rekombinasyon mekanizmaları: (a) banddan-banda rekombinasyon ve (b) banddan-katkıya rekombinasyon 8
Şekil 1.4	Elmas yapısının kübik hücresindeki atom konumlarının kübün taban yüzeyi üzerindeki izdüşümleri 9
Şekil 1.5	Elmas kristal yapısı ve dördü bağ düzeni 10
Şekil 1.6	Silisyum için elektron yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi 11
Şekil 1.7	(a) Doğrudan ve (b) dolaylı bir yarıiletken band aralığı yakınındaki band yapısı 14
Şekil 1.8	Silindirik boşlukları (a)-(c) ve dikdörtgen boşlukları (d)-(f) içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş görünüşü 15
Şekil 1.9	(a) Gözenekli Si üretiminin şeması, (b) ve (c) gözenek yakınında anodik aşındırmadaki kimyasal süreç, (d) gözenekteki ve hacimli ve gözenekli Si arasındaki Si-elektrolit geçişi için band diyagramı 16
Şekil 1.10	Gözenekli silisyum oluşumu için HF asit içindeki silisyum elektrotların çözünme mekanizması 20
Şekil 1.11	Elektron-boşluk çiftleri oluşturmak için tabakanın foton enerji ilişkisini göstermek üzere gözenekli tabakanın şematik kuantum sınırlama modeli 21
Şekil 1.12	HF içinde p-tipi silisyumun anodizasyonu için tipik I-V karakteristiği 22
Şekil 1.13	Gözenekli silisyum oluşma mekanizmasının görünümü 24
Şekil 1.14	Tek boyutlu yarıiletken kuantum kuyusunun şematik diyagramı 27
Şekil 1.15	Kristal boyutunun fonksiyonu olarak silisyum nanokristalinin enerji aralığı 28
Şekil 1.16	Ortalama kristal boyutu ile fotoluminesans şiddeti arasındaki ilişki 29
Şekil 1.17	Oda sıcaklığında değişik hazırlama koşulları ile üretilmiş gözenekli silisyum örneklerin fotoluminesans spektrumları 31
Şekil 1.18	Metal-n-tipi yarıiletkenin kontakta önceki enerji diyagramı ($\Phi_m > \Phi_n$) 34
Şekil 1.19	Elektriksel kontakt halinde metal-yarıiletken için enerji diyagramı ($\Phi_m > \Phi_n$) 35
Şekil 1.20	V gerilimi altında metal-n-tipi yarıiletken kontaktı 36
Şekil 1.21	V gerilimi altında metal-n-tipi yarıiletken kontaktı 38
Şekil 1.22	Bir metal-n-tipi yarıiletkenin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği 39
Şekil 1.23	Temas haline getirilmeden önce n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin band şemaları 41
Şekil 1.24	Kontaktan sonra n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin oluşturduğu heteroeklemin band şeması 41
Şekil 2.1	Gözenekli silisyumun elde edilmesinde kullanılan deney düzeneği 42
Şekil 2.2	Gözenekli silisyumun yüzey kontakları 44
Şekil 2.3	I-V karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şeması 45
Şekil 2.4	Fotoluminesans ölçümleri için kullanılan devrenin şeması 46

Şekil 2.5	Filmlerin yansıma ve soğurma katsayılarının belirlenmesi için $T=f(\nu)$ eğrisi	49
Şekil 2.6	Tavlamadan önce fotolüminesans veren örneğin SEM resmi (çizgi= $1\mu\text{m}$)	51
Şekil 2.7	Tavlamadan sonra fotolüminesans vermeyen örneğin SEM resmi (çizgi = $1\mu\text{m}$)	51
Şekil 3.1	Gözenekli silisyum örneğin tavlamadan önceki fotolüminesans spektrumu	52
Şekil 3.2	Gözenekli silisyum örneğin tavlamadan sonraki fotolüminesans spektrumu...	53
Şekil 3.3	Gözenekli silisyum filminin direncinin kalınlıkla değişimi	55
Şekil 3.4	Tek kristalli silisyumun FTIR'da elde edilen geçirgenlik spektrumu	57
Şekil 3.5	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan önceki optik spektrumu	58
Şekil 3.6	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan sonraki optik spektrumu (T = 190°C , t = 60dak.)	59
Şekil 3.7	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan önceki optik spektrumu	60
Şekil 3.8	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan sonraki optik spektrumu (T = 140°C , t = 210dak.)	61
Şekil 3.9	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan önceki optik spektrumu	62
Şekil 3.10	Gözenekli silisyum filminin tavlamadan sonraki optik spektrumu (T = 80°C , t = 240dak.)	63
Şekil 3.11	Si-O-Si pikinin ($\nu = 1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 190°C)	64
Şekil 3.12	Si-H ₂ pikinin ($\nu = 910\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 190°C)	64
Şekil 3.13	Si-H ₂ pikinin ($\nu = 2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 190°C)	65
Şekil 3.14	Si-O-Si pikinin ($\nu = 1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 140°C)	65
Şekil 3.15	Si-H ₂ pikinin ($\nu = 910\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 140°C)	66
Şekil 3.16	Si-H ₂ pikinin ($\nu = 2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 140°C)	66
Şekil 3.17	Si-O-Si pikinin ($\nu = 1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 80°C)	67
Şekil 3.18	Si-H ₂ pikinin ($\nu = 2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi (T = 80°C)	67
Şekil 3.19	Tek kristalli silisyumun geçirgenlik spektrumu	68
Şekil 3.20	Altlıktan ayrılmış gözenekli silisyumun soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki ilişki.....	69
Şekil 3.21	Gözenekli silisyum film yüzeylerine yapılan kontakla.....	70
Şekil 3.22	Gözenekli silisyum filminin akım-gerilim karakteristiği	70
Şekil 3.23	Al-GS-Si yapının karanlıkta akım-gerilim karakteristiği T=300 K	71
Şekil 3.24	Al-GS-Si yapının karanlık ve doğru yöndeki akım yoğunluğu -gerilim karakteristiği T=300 K	72
Şekil 3.25	Al-GS-Si yapının farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği	73
Şekil 3.26	Doyma akımının sıcaklıkla değişimi	74
Şekil 3.27	Al-GS-Si yapının karanlık ve aydınlıktaki I-V karakteristiği	75

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Gözenekli silisyum film kalınlığı ile filmin fotolüminesans veren kısmının kalınlığı arasındaki ilişki	54



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, tez yöneticiliğimi üstlenen ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Prof. Dr.Yani SKARLATOS'a çok teşekkür ederim.

Çalışmamın ortaya çıkmasında çok büyük emeği olan, her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren, yardımlarını ve vaktini hiçbir zaman esirgemeyen sayın Prof. Dr.Tayyar CAFEROV'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın ilk aşamalarını beraber yürüttüğümüz sayın Yrd. Doç. Dr. C. Süha AKÇİZ'e teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında bana her türlü desteği sağlayan bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Durul ÖREN ve sayın Prof. Dr. Emel ÇINGI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yazım aşamasında yardımcı olan çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Ercüment AKAT, Arş. Gör. Serkis YEŞİLKAYA, Arş. Gör. Ogeday OLCAYTO'ya ve kardeşim Arş. Gör. Nursel CAN'a teşekkür ederim.

Silisyum kristallerinin temini ve elde edilen gözenekli silisyum örneklerin fotolüminesans spektrumlarının incelenmesine olanak sağlayan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ne ve SEM (Scanning Electron Microscopy) fotoğraflarını çeken İTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Ayrıca göstermiş oldukları desteklerinden dolayı çok kıymetli aileme ve çalışmalarımda bana destek ve yardımcı olan sevgili eşim Mustafa ÖMÜR'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Birsel CAN ÖMÜR

Ocak, 1999

ÖZET

Bu çalışmada, n ve p-tipi tek kristalli silisyum katmanlarının elektrokimyasal anodizasyonu ile gözenekli silisyum elde edilmiştir. Elde edilen gözenekli silisyum örneklerin kalınlıkları yaklaşık 10-30µm arasındadır.

Gözenekli silisyum filmler üzerine UV ışık düşürüldüğünde, gözle görülebilen turuncu fotoluminesans gözlemlendi. Örneklerin fotoluminesans şiddetlerinin dalga boyuna bağlı değişimleri ölçüldü ve örneğe tavlama verilerek fotoluminesans şiddetinin nasıl değiştiği incelendi.

Gözenekli silisyumun optik özelliklerinin incelenmesi için örnek yüzeyinden ince bir film tabakası ayrıldı. Filmlerin uzun dalga boylarındaki optik spektrumları ($T=f(\nu)$) Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisinde elde edildi. Bu eğrilerden filmlerin yansıma ve soğurma katsayıları hesaplandı. Filmlerin soğurma katsayılarının tavlamaya bağlı değişimlerini incelemek için, filmlere farklı sıcaklıklarda tavlama verilerek, $T=f(\nu)$ eğrileri tekrar alındı ve tavlamanın gözenekli silisyumun yapısını nasıl etkilediği incelendi. Kısa dalga boylarındaki optik spektrumları da elde edilerek tek kristalli ve gözenekli silisyumun band aralıkları hesaplandı. Ayrıca, tavlamanın geçirgenliğe etkisi de incelendi.

Örneklerin karanlık ve aydınlıktaki akım-gerilim karakteristikleri incelenerek doyma akımının sıcaklıkla değişimi, Φ_B engel yüksekliği ve n ideallik faktörü hesaplandı. Aynı zamanda, gözenekli silisyumun öz direnci de elde edildi.

ABSTRACT

In this work, porous silicon has been obtained by electrochemical anodization of single crystal silicon wafers of both n and p type. The thicknesses of the samples are around 10-30 μm .

When some ultraviolet light is shed on the porous silicon films, it has been observed that it emits visible orange photoluminescence. The variations in the photoluminescent intensities of the samples depending on the wavelength have been measured and the way the intensity of the photoluminescence changes examined as a result of the annealing of the sample.

A thin film layer has been separated from the surface of the sample in order to explore the optical characteristics. The reflection and absorption coefficients of the films have been calculated from the long wavelength optical spectra of the films ($T=f(\nu)$) in the Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. To investigate the variations of the absorption coefficients of films depending on the amount of annealing, the curves $T=f(\nu)$ have been obtained by annealing the films at different temperatures and how annealing effects the structure of the porous silicon examined. Having achieved the optical spectra in short wavelengths, the band gaps of both single crystal and porous silicon samples calculated and the effect of annealing on the transmission examined.

After the investigation of the current-voltage characteristics of the samples with or without light, the variation of the saturation current with temperature, the barrier height Φ_B and ideality factor n have all been calculated and at the same time the resistivity of the porous silicon found.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Gözenekli silisyum (GS), silisyumun anot olarak hidroflorik asit (HF) içinde elektrokimyasal olarak aşındırılması sırasında 1956 yılında bulundu (Uhlir, 1956). Çeşitli gözenek geometrilerinde davranan kırılğan gözenekli silisyum iskelet elde edildi. Anodizasyon işlemindeki kontrol parametreleri silisyum altlıktaki katkı konsantrasyonu, katkı tipi (n veya p), akım yoğunluğu ve elektrolit konsantrasyonudur. Gözlenen morfolojiler, birbirine bağlı düzgün bir ağdan geniş boru tipinde doğrusal gözeneklere kadar değişim gösterir.

1990 yılında gözenekli silisyum, bu malzemedeki etkili görünür fotoluminesans elde edildiği zaman bir bakıma yeniden bulunmuş oldu (Canham, 1990). Yarıiletken sanayinin gelişmesine yardım etmesine karşın optoelektronik aygıtları kapsamı mümkün olmamıştı. Görünür fotoluminesansın gözlenmesi ile bu konuda bir iyimserlik oluştu. Son yıllarda, gözenekli silisyum konusunda çoğu deneysel olmak üzere çok sayıda yayın (≈ 1000) yapıldı.

Gözenekli silisyum oluşumu için yeterli bir teori, deneysel parametrelerle değişen morfolojilerde gözlenen geçişte olduğu gibi, düzgün aşındırmaya göre, tercihli gözenek oluşumunu açıklayabilmelidir. Bunu nitel bir şekilde elde etmeyi amaçlayan ilk teoriler, yarıiletken-elektrolit arayüzeyinin özel bir modeline deneysel yollarla bağlanmıştı. Bizi ilgilendiren Si-HF sistemine gelince; aşındırma işlemi, (i) çözünme elektrokimyası, (ii) silisyumun yarıiletken özellikleri, (iii) yarıiletkendeki taşıyıcıların taşınması, (iv) elektrolitteki taşıyıcı iyonlar ve (v) silisyumda düzensizlikler şeklindeki yüzey olayları veya sıvının yüzey gerilmesi gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Önceki modellerin bazıları, gözenek oluşumu için belirleyici etken olarak çözünme kimyası üzerinde odaklanmıştı. Daha sonraları ilgi, Si altlıktaki elektrik alan dağılımındaki olası yüzey olaylarına doğru kaydı.

Sistemin yarıiletken özelliklerinin elektrik alanının yeniden dağılımında oynadığı rol, gözenekli silisyum oluşumunda önemli oldu. Son on beş yılda, dengede olmayan büyütme olayı daha iyi anlaşıldığından, çok sayıda çalışma "Sınırlı Yayılma Modeli" üzerinde yapıldı.

Farklı anodizasyon koşullarında elde edilen gözenekli silisyum, çeşitli zengin ve karmaşık yapılar gösterir. Değişen bu davranışların varlığı, silisyumun çözünme elektrokimyasından başka, bazı ilginç fiziksel süreçlerin işlediği görüşüne yol açtı. Gözenekli silisyumda görülen büyütme şekilleri, dengede olmayan büyütme olaylarında gözlenen elektrokimyasal çözünme ve dielektrik bozulma (breakdown) gibi olaylara benzerdir. Silisyumda gözenek büyütmesini açıklamak için öne sürülen modellerin çoğu, tam çözünme kimyası ile ilgilenmeyip, gözenekli silisyum yapılarındaki anodizasyon koşullarının etkisini açıklamak için fiziksel görüşler ileri sürerler. Bu, silisyumun ayrıntılı çözünme kimyasının karmaşık ve anlaşılır olmaması gerçeğinden kaynaklanır. Çok sayıda çözünme mekanizmasının ileri sürüldüğü en iyi yayın, Smith ve Collins'in (1992) makalesidir.

Gözenekli silisyum oluşumunu açıklamak için öne sürülen ana modeller geniş olarak iki sınıfa ayrılabilir. Önceki modeller, daha çok silisyum-elektrolit sistemlerinde elektrik alanın yeniden dağılımına dayanan görüşlerin öne sürüldüğü fiziksel olaylardır. Son zamanlarda, Si-HF sistemini, deneysel koşullarla bazı ilişkiler kuran basitleştirilmiş parametreler modeli ile sınamak için çok sayıda bilgisayar simülasyonu da yapıldı (John ve Singh, 1995a).

Literatürde gözenekli silisyumun çok geniş araştırılmasına rağmen, bu malzemenin kompozisyonu ve görünür spektrumdaki fotolüminesans olayının kompozisyonla ilişkisi çok az incelenmiştir. Gözenekli silisyumun kırmızı ötesi optik titreşim spektrumlarından elde edilmiş kompozisyonunu ve fotolüminesans olayının tavlama sıcaklığı ile ilişkisini incelemek bu çalışmanın amacıdır.

1.2 Yarıiletkenlerin Lüminesansı

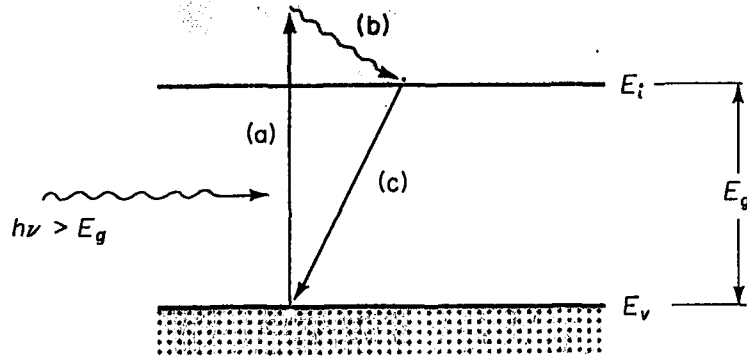
Bir yarıiletkende elektron-boşluk çiftleri oluşturulduğunda veya daha yüksek katkı seviyelerine uyarılan taşıyıcılar denge durumlarına düşüklerinde malzemedan dışarıya ışık yayılabilir. Yarıiletkenlerin çoğu, özellikle doğrudan band geçişli bileşik yarıiletkenler ışık emisyonu için uygundur. Işık emisyonunun genel özelliğine *lüminesans* adı verilir (Streetman, 1972).

1.2.1 Lüminesans türleri

Lüminesans, madde içinde enerjinin soğurulması ve kızıl ötesi, görünür ve mor ötesi radyasyonda tekrar yayınlanmasıdır. İlk uyarma, ışıkla, parçacık bombardımanı, elektrik enerjisiyle, mekanik kuvvetlerle, kimyasal reaksiyonlarla veya ısıyla yapılabilir. Lüminesans olayları uyarılma mekanizmasına göre isimlendirilir (Gezci, 1992). Foton soğurulması ile uyarılan taşıyıcıların rekombinasyonundan dolayı meydana gelen ışımaya *fotolüminesans* (Streetman, 1972) ; elektrik enerjisi ile uyarılmalara *elektrolüminesans* (Gezci,1992); elektron demeti veya katot ışınları yardımıyla uyarılma sonucu oluşan ışımaya *katodolüminesans* (Sze, 1981); bir cismin ısıtılmasıyla oluşan ışımaya *termolüminesans* ; kristallerin kırılması veya parçalanması esnasında görülen ışımaya *tribolüminesans*; radyoaktif ışınlarla uyarılmalara *radyolüminesans*; bir fosfor veya organik molekülün kimyasal reaksiyon esnasında serbest kalan enerjisinin ışımaya *kemilüminesans*; biyolojik maddelerin yaydığı ışımaya *biolüminesans*; bir cismin yanması esnasında alev içindeki ışımaya *kandolüminesans* denir (Gezci,1992).

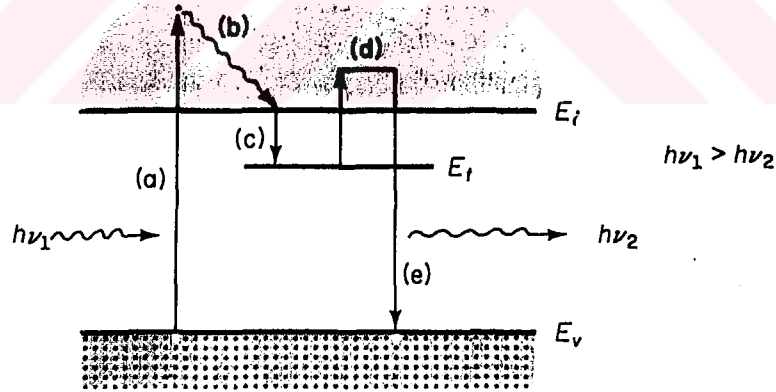
a) Fotolüminesans. Uyarılma fotonların soğurulması ile olur. Işıma kaynağı kızıl ötesi, görünür, mor ötesi veya X-ışını radyasyonu olabilir (Azaroff, 1963).

Bir yarıiletkenden ışık emisyonunun en basit örneği Şekil 1.1'de gösterildiği gibi doğrudan uyarılmalar ve elektron-boşluk çiftlerinin rekombinasyonu ile oluşur. Eğer doğrudan rekombinasyon kusur seviyelerinden olan rekombinasyona göre çoğunlukta ise süreçte band aralığı ışımaya görülebilir. Sabit-durum uyarılma için elektron-boşluk çifti rekombinasyonu üretilme ile aynı oranda gözlenir ve soğurulan her foton için bir foton yayınlanır.



Şekil 1.1 $h\nu > E_g$ için fotonun optik soğurulması (a) Foton soğurulması sırasında elektron boşluk çifti yaratılır. (b) Uyarılmış elektron saçılmalarla örgüye enerji verir. (c) Elektron valans bandındaki bir boşlukla birleşir (Streetman, 1972)

Doğrudan rekombinasyon hızlı bir süreçtir; elektron-boşluk çiftinin ortalama ömrü genellikle 10^{-8} s mertebesinde veya daha azdır. Böylece fotonların emisyonu uyarılma kesildikten sonra yaklaşık 10^{-8} s içinde durur. Bu tip hızlı lüminesans süreçleri genelde *fluoresans* olarak adlandırılır. Bununla beraber, bazı malzemelerde emisyon, uyarılma kesildikten sonra birkaç saniye ve dakikalar boyunca sürer. Bu yavaş süreçler *fosforesans* ve malzemeler ise *fosfor* olarak adlandırılır. Yavaş sürece bir örnek Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Fotolüminesansta elektronlar için tuzaklama seviyesini içeren uyarılma ve rekombinasyon mekanizmaları (Streetman, 1972)

Bu malzemede, band aralığında iletkenlik bandındaki elektronları yakalama (tuzaklama) eğiliminde olan muhtemelen katkıya bağlı bir kusur seviyesi vardır. Şekilde gösterilen olaylar aşağıdaki gibidir: (a) $h\nu_1 > E_g$ ile gelen foton soğurularak elektron-boşluk çifti yaratılır. (b) Uyarılan elektron, iletkenlik bandının alt kısmına yaklaşıncaya kadar saçılmalar yoluyla örgüye

enerji verir. (c) Elektron E_t katkı seviyesinde tuzaklanır ve iletkenlik bandına termal olarak tekrar uyarılana kadar tuzaklanmış olarak kalır (d); (e) Son olarak, doğrudan rekombinasyon, elektronun valans bandındaki bir boşluğa düşerken yaklaşık olarak band aralığına eşit enerjideki bir foton ($h\nu_2$) yayımlaması ile oluşur. Eğer tuzaktan (d) termal uyarılma olasılığı küçükse uyarılma ve rekombinasyon arasındaki gecikme zamanı nispeten uzun olabilir. Hatta, rekombinasyondan önce elektron birkaç kez tuzaklanırsa gecikme zamanları daha uzun sürebilir. Eğer tuzaklama olasılığı rekombinasyon olasılığından büyükse rekombinasyon, elektronun tuzak ve iletkenlik bandı arasında birkaç gidiş gelişinden sonra oluşur. Böyle bir malzemedeki fosforesans ışığın emisyonu, uyarılma kesildikten sonra nispeten uzun bir zaman için devam eder (Streetman, 1972).

Tuzaklama sürecini anlamak için, kusur seviyesi yolu ile rekombinasyon mekanizmasını incelemeliyiz. İletkenlik bandından sonra elektron, band aralığındaki bir seviyeye düşer. İletkenlik bandına yeniden uyarılabilir veya bir boşluğu yok ederek valans bandına düşebilir. Bu ikinci süreç, rekombinasyon seviyesinde yakalanmış olan bir boşluğa eşdeğerdir. Kusur merkezlerine bir örnek, geçici olarak bir tip taşıyıcıyı tuzaklayan yükü fazla olan katkılardır (Şekil 1.2). Dengedeki (+2) yüklü katkı, iletkenlik bandından bir elektron yakalanmasından sonra (+1) değerlikli kalır. Boşluğun bir sonraki yakalanması (rekombinasyon sürecini tamamlama), bu boşluğun pozitif merkezdeki geri itici Coulomb engelini aşmasını gerektirir. Bu olasılık, elektronun iletkenlik bandına yeniden uyarılma olasılığına göre daha küçük olabilir. Eğer yeniden uyarılma baskın olursa, kusur merkezi geçici olarak sadece elektronu tuzaklama işlevini görür, bu sebeple rekombinasyon süreci gecikir (Streetman, 1972).

Fotoluminesansın ilk uygulamalarından biri, iç yüzeyi fosfor ile kaplanmış camların kullanıldığı floresans lambalardır (Azaroff, 1963).

b) Katodoluminesans. Fosfor yüksek enerjili elektronlarla veya katot ışınları ile bombardıman edildiğinde katodoluminesans oluşur (Azaroff, 1963). Lüminesans malzemelerin yüksek enerjili elektronlar ile uyarılmasına en genel örnek katot-ışınları-tübüdür (Streetman, 1972).

c) **Elektrolüminesans.** Elektrolüminesans olayı 1907 yılında keşfedildi (Sze, 1981). Fosforun yüksek dielektrik sabitine sahip bir yalıtkan içine konup, kristal boyunca alternatif elektrik alan uygulanması sonucunda elektrolüminesans oluşur. Uyarılan elektron temel düzeyine aşamalarla geri döndüğünde görünür ışık yayılır. Yayılan ışık gerilimin ve uygulanan alanın frekansının bir fonksiyonudur (Azaroff,1963). Bu sistem, bazı televizyonlarda katodolüminesansın yerini almıştır.

d) **Termolüminesans.** Elektronların ilk uyarımı termal yolla olmaz. Çok düşük sıcaklıklarda başka yollarla uyarılırlar ve yasak banddaki seviyelerde tuzaklanırlar. Düşük sıcaklık bu seviyelerin boşalmasını yavaşlatır ve fosforun sıcaklığı artana kadar lüminesans oluşmaz. Bu yüzden, termolüminesans özellikle katkı seviyelerinin belirlenmesinde kullanışlıdır. Çünkü, ısıtma boyunca elektronların soğurduğu termal enerji yayılan ışımının enerjisi ile ilişkilidir (Azaroff,1963).

e) **Tribolüminesans.** İki sert yalıtkanın birbirine kuvvetlice sürtünmesi ile oluşur. Sürtünen yüzeylerde oluşan elektronik uyarılmalar diğer lüminesans süreçlerine benzerdir (Azaroff, 1963).

1.2.2 İletkenlik bandı - valans bandı ve band - katkı seviyeleri geçişlerinde rekombinasyon

Bir yarıiletkende üretilen elektron-boşluk çiftleri yeniden birleşebilir. Elektron-boşluk konsantrasyonu arttıkça yeniden birleşme süreçleri daha baskın olurlar. Taşıyıcı konsantrasyonu sabit-durum değerlerine, üretilme hızı G , rekombinasyon hızı R tarafından dengelendiği zaman ulaşır.

$$G = R \quad (1.1)$$

Rekombinasyon süreçleri doğrudan (banddan banda) ışınımlı rekombinasyon, ışımali banddan katkıya rekombinasyon, katkı (tuzak) seviyeleri üzerinden ışımaz rekombinasyon ve yüzey rekombinasyonunu içerir.

Işınımlı banddan banda rekombinasyon hızı bir np çarpımı ile orantılıdır. Dejenere olmayan bir yarıiletken için,

$$R = \frac{G_{th}np}{n_i^2} \quad (1.2)$$

dir. Burada; G_{th} termal üretilme hızı, n elektron konsantrasyonu ve p boşluk konsantrasyonudur. Böylece dengede beklenildiği gibi $np = n_i^2$ geçerli olur. (1.2) denklemi,

$$R = C_r np \quad (1.3)$$

şeklinde tekrar yazılabilir. C_r ışınımlı rekombinasyon katsayısıdır.

Sabit-durumda

$$G = C_r np = C_r (n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) \quad (1.4)$$

olduğu bulunur. Burada, $\Delta n = \Delta p$ fazla elektron ve boşlukların konsantrasyonlarıdır, n_0 ve p_0 ise elektron ve boşlukların denge konsantrasyonlarıdır ($n_0 p_0 = n_i^2$). Elektron-boşluk çiftlerinin üretilmesi ışık sebebiyle olursa, üretim hızı G , I ışık şiddeti ile orantılıdır. Örneğin, denge şartları altında bir n-tipi yarıiletken düşünelim. Burada, $n_0 = N_d$ olsun. N_d sığ (shallow) donörlerin konsantrasyonudur ve aynı zamanda $p_0 = \frac{n_i^2}{N_d}$ ifadesi geçerlidir.

$\Delta n \ll N_d$ fakat $\Delta p \approx \Delta n$ olduğu düşük ışık şiddetlerinde (1.4) denkleminde

$$\Delta n = G \tau_r \quad (1.5)$$

olduğunu buluruz. Burada,

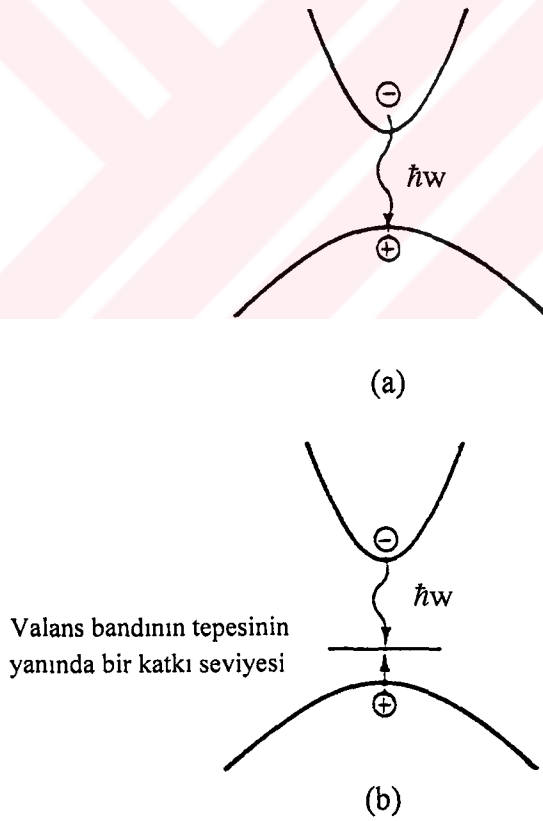
$$\tau_r = \frac{1}{C_r N_d} \quad (1.6)$$

ışınımlı band - band geçişlerin ömrü olarak adlandırılır.

Pratik ışık veren yarıiletken aygıtlarda, ışınlı banddan katkıya rekombinasyon (Şekil 1.3b), genellikle banddan banda ışınlı rekombinasyondan (Şekil 1.3a) daha önemlidir. *İşınımlı band - katkı geçişlerin ömrü*

$$\tau_r = \frac{1}{B_r N_A} \quad (1.7)$$

olarak verilir. B_r ışınlı rekombinasyon katsayısıdır ve N_A ise rekombinasyon sürecine katılan katkıların konsantrasyonudur (Shur, 1990).

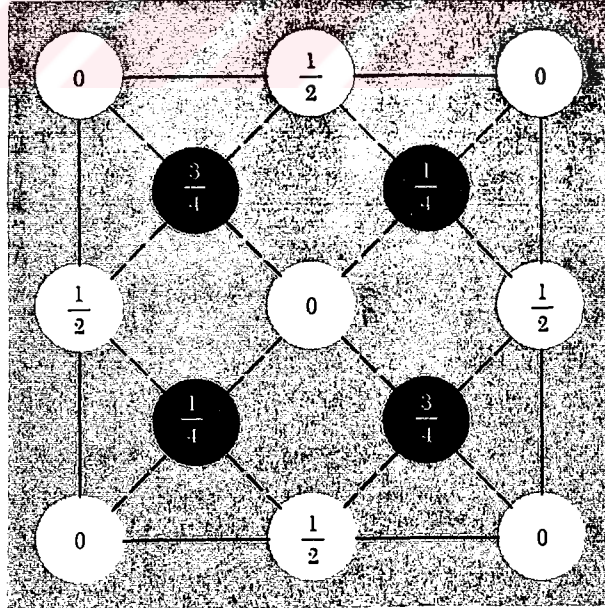


Şekil 1.3 Işınımlı rekombinasyon mekanizmaları: (a) banddan-banda rekombinasyon ve (b) banddan-katkıya rekombinasyon (Shur, 1990)

1.3 Tek Kristalli Silisyumun Özellikleri

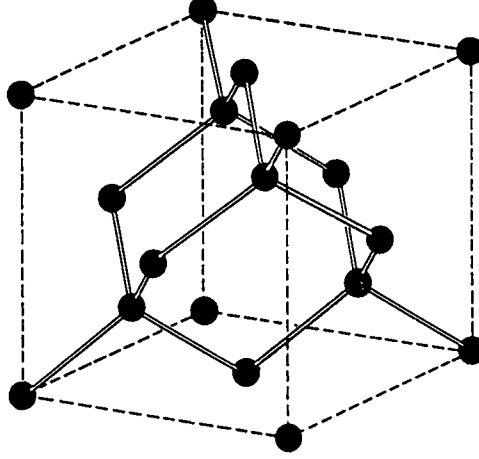
Yarıiletkenler arasında en çok silisyum kullanılmaktadır. Tamamen saf ve kristal yapısı kusursuz bir Si kristali mutlak sıfır sıcaklığında mükemmel bir yalıtıcıdır. Silisyum dört valans elektronu olan elementtir. Elmas yapısında kübik kristal halinde bulunur. Kristalin primitif hücresinde iki atom vardır. Her atomun 4 valans elektronu olduğu için bu kristalin primitif hücresinde $2 \times 4 = 8$ elektron bulunacak demektir (Akpınar, 1979). Elmas yapısında tek atomlu bir baz oluşturacak ilkel hücre seçme olanağı yoktur (Kittel, 1996). Bu çift sayıda elektron bir bantta mevcut izinli seviyeleri doldurur (Akpınar, 1979).

Elmasın uzay örgüsü fcc (yüzey merkezli kübik) dir. Bu örgünün her noktasına bağlı ilkel bazda 000 ve $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}$ konumlarında özdeş iki atom bulunur (Şekil 1.4). Şekildeki kesirli sayılar her atomun taban düzleminden yüksekliğini, kübün bir kenarı cinsinden gösterir. 0 ve $\frac{1}{2}$ olan noktalar fcc örgüsünde, $\frac{1}{4}$ ve $\frac{3}{4}$ olanlar ise, cisim köşegenini kendi yönünde çeyrek uzunlukta kaydırarak elde edilen benzer diğer bir örgü üzerindedir.



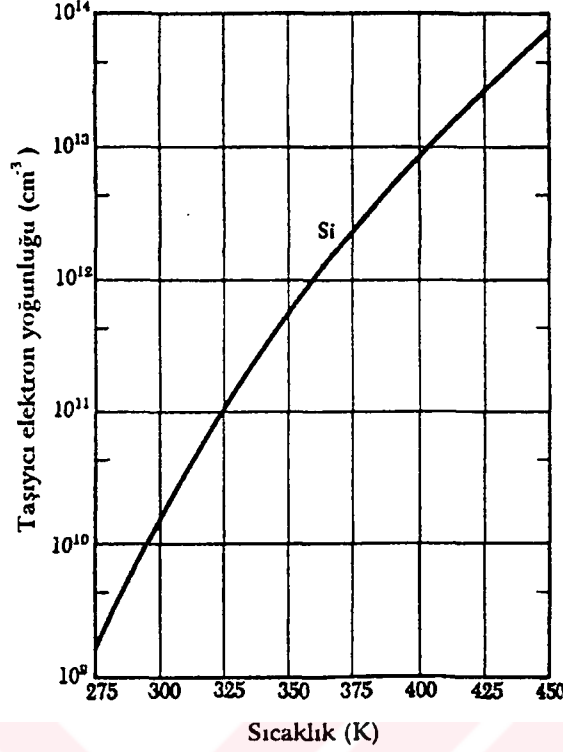
Şekil 1.4 Elmas yapısının kübik hücresindeki atom konumlarının kübün taban yüzeyi üzerindeki izdüşümleri (Kittel, 1996)

Şekil 1.5’de elmas yapının dörtdü bağ düzeni gösterilmiştir. Her atomun en yakın komşu sayısı 4, ikinci en yakın komşu sayısı 12 dir. Elmas yapısı nispeten boş demektir, kürelerle doldurulabilen maksimum hacim oranı sadece 0.34 dür. Elmas yapısında kristalleşen silisyumun örgü sabiti $a=5.43\text{Å}$ dır. Burada a , ilkel kübün kenar uzunluğudur.



Şekil 1.5 Elmas kristal yapısı ve dörtdü bağ düzeni (Kittel, 1996)

0 K sıcaklıkta tamamen dolu olan en yüksek elektron enerjili banda *valans bandı*, valans bandının üstündeki ilk boş (veya kısmen boş) banda *iletkenlik bandı* adı verilir (Akpınar, 1979). İletkenlik bandı, valans bandından E_g kadar bir enerji aralığı ile ayrılmıştır. Band aralığı, iletkenlik bandının en düşük enerjisi ile valans bandının en yüksek enerjisi arasındaki enerji farkıdır. İletkenlik bandının en düşük noktası *iletkenlik band dibi*, valans bandının en yüksek noktası ise *valans band tavanı* olarak adlandırılır. Sıcaklık arttıkça elektronlar valans bandından iletkenlik bandına termal uyarma yoluyla geçerler (Şekil 1.6). Hem iletkenlik bandındaki elektronlar, hem de bunların valans bandında bıraktıkları boşluklar elektrik iletkenliğe katılırlar (Kittel, 1996).



Şekil 1.6 Silisyum için elektron yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi (Kittel, 1996)

Dolaylı band aralığına sahip olan silisyumun yasak band aralığı , 0 K'de 1.17eV ve 300 K'de 1.12eV'tur (Sze, 1981).

Silisyum, mikroelektronik devrimin merkezini oluşturur ve öteki yarıiletkenlere olan üstünlüğü işleme özellikleri ve ondan oluşan büyük teknolojik tabandan kaynaklanır. Bir başka yarıiletkenin elektronik uygulamalarda yerini kolaylıkla alamayacağı silisyum, bununla birlikte çok etkisiz bir ışık yayıcı olup bu yüzden optik uygulamalarda aynı üstünlük düzeyine ulaşamamıştır.

Silisyum katmanlarda belli bir optoelektronik düzey sağlanmıştır, örneğin yüksek nitelikli optik algılayıcılar silisyumdan üretilebilir ve bu tür uygulamalar yaygındır. Optik elektronik bileşimi, LED (ışık yayan diyotlar) 'leri ve yarıiletken lazerleri, algılayıcı ve elektronik bileşenler içeren aynı katmanın üzerine yerleştirmeyi gerektirir. Günümüz teknolojisinde ışık-yayan yarıiletken araçlar doğrudan band aralığı olan, GaAs ve InP gibi, silisyumdan çok daha yüksek verimi olan yarıiletkenlerden üretilmektedir (Collins vd.,1997).

1.4 Gözenekli Silisyum

En yalın tanımıyla, gözenekli silisyum boşluklarla çevrelenmiş nanometre boyutlarında silisyum bölgelerden oluşan bir ağıdır. Bir gözenekli silisyum film tabakası, silisyum katman yüzeyinin elektrokimyasal anodizasyonu ile hazırlanır (Collins vd., 1997).

Son zamanlarda, silisyum bilim ve teknolojisinde, silisyum mikroelektronığı ile optoelektronik aygıtların integrasyonuna olan ilgi, yüksek kuantum verimliliğine sahip ışık yayan Si-kökenli malzemeler ve yapılar için araştırmaya yol açtı. Mikroelektronikte önemli bir malzeme olan kristal silisyum, $\sim 1.1\text{eV}$ 'luk dolaylı band aralıklı yapısından ve küçük bir eksiton bağlanma enerjisinden ($\sim 15\text{meV}$) dolayı, oda sıcaklığında verimli ışık yayılımı göstermez. Si'deki optik geçişlerin dolaylı doğasının üstesinden gelmek için ümit verici bir yaklaşım, düşük-boyutlu Si nanoyapılarındaki uzaysal sınırlandırmadan dolayı k-seçim kurallarının serbest kalmasıdır. Düşük-boyutlu yarıiletken sistemlerde genellikle üç kategori düşünülür. Bunlar iki-boyutlu (2D) kuantum kuyuları, bir-boyutlu (1D) kuantum telleri ve sıfır-boyutlu (0D) kuantum noktalarıdır. Verimli görünür ışık yayılımı, 0D sistemlerindeki nanometre boyutlu Si kristallerinde oda sıcaklığında bile gözlenmiştir. Optoelektronik uygulamalarda malzeme olarak, IV.grup dolaylı band aralıklı yarıiletkenler için yeni olanaklar açtığından, nanometre boyutlu Si kristallerinden lüminesansın bulunması son derece önem kazanmıştır (Kanemitsu, 1995).

Gözenekli silisyumun ışık yayma özelliklerine olan ilgi yakın zamanda yoğunlaştıysa da bu malzeme ilk olarak 1956 yılında Uhlir tarafından silisyumun elektroparlatılması sırasında bulunmuştur. Üretim koşulları ile silisyumun, yapısal ve elektronik özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Akım yoğunluğu, HF konsantrasyonu, aşındırma sırasında aydınlatma olup olmadığı ve özellikle silisyumun katkı türü ve öz direnci gözenekli katmanın yapısını etkiler. Örneğin zayıf katkılı p-tipi malzeme süngerimsi bir gözenek yapısı oluşturmaya yönelikken n-tipi ve yoğun katkılı p-tipi silisyum, ağaç gibi ya da sütunsu özelliklerin ortaya çıkmasına neden olur. Gözeneklerin (boşlukların) oranı %50-90 arasında değişir ve yüksek gözeneklilikte ışık yayma daha etkin bir şekilde ortaya çıkar (Collins vd., 1997). Gözenekli Si'un kimyasal özellikleri üzerinde uzun yıllar çalışılmasına rağmen oluşum mekanizması

hala tam olarak anlaşılammıştır. Gözenekli yapıların oluşumunu açıklamak için çok sayıda farklı model ileri sürülmüştür (Kanemitsu, 1995).

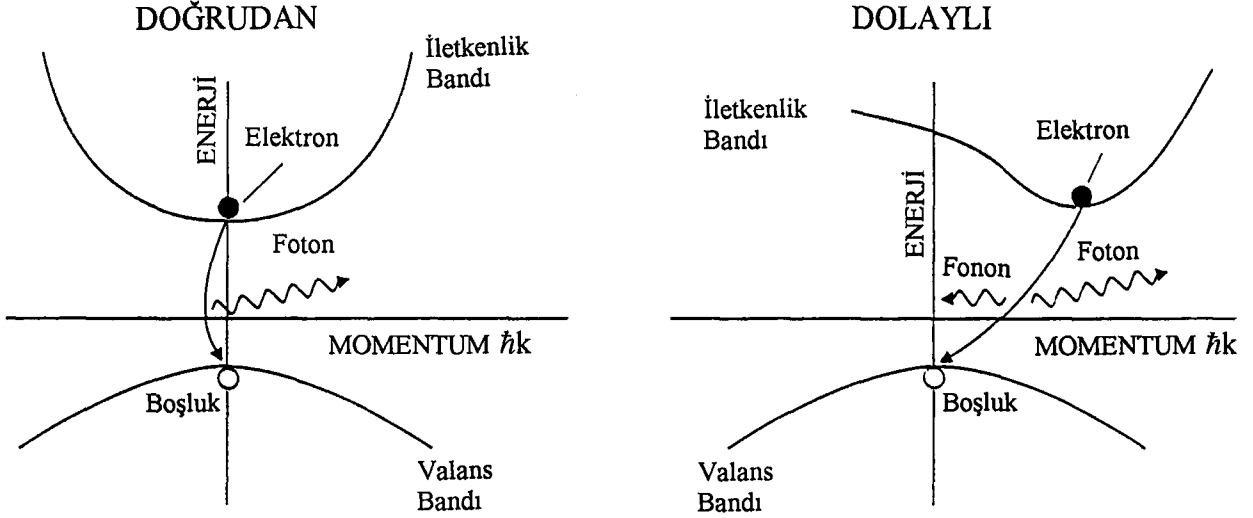
1990 yılında, Leigh Canham, bir silisyum katman yüzeyinde oluşturulan gözenekli silisyumdan oda sıcaklığında görülebilir fotoluminesans elde edilebileceğini bildirdi. Gözenekli silisyum için söylenen bu ışık yayma özellikleri şu nedenlerle biraz tartışmalıydı. Birincisi, yayma enerjisi hacimli silisyum band aralığının oldukça üzerindeydi. İkincisi, enerji (ya da renk) görünür spektrum üzerinde, kırmızı, yeşil ve mavi renk gerektiren durumlar için önemli bir nokta olan hazırlama koşullarını değiştirerek ayarlanabiliyordu. Son olarak da kuantum verimi, doğrudan band aralıklı yarıiletken bileşiklerinkine yakındı (Collins vd., 1997).

O günkü silisyum kökenli optoelektronik teknoloji üzerinde tartışmalar yaratan ve gözenekli silisyuma yönelik araştırmalarda büyük canlılık yaratan Canham'ın makalesinden sonra lüminesans mekanizmasının temel özelliklerini ortaya çıkarmadaki düzenli gelişmeler hala sürmektedir. Gözenekli silisyumun optoelektronik uygulamalardaki uygunluğu önemli bir araştırma alanı oldu ve verimi %0.1'den daha büyük olan oda sıcaklığında çalışan LED'ler üretildi (Collins vd., 1997).

Gözenekli silisyumun optik özelliklerini yorumlamada dolaylı-band aralıklı bir yarıiletken olan hacimli silisyumun neden düşük bir optik verimi olduğunu anlamak önemlidir. Şekil 1.7, GaAs gibi doğrudan ve Si gibi dolaylı band aralıklı yarıiletkenlerin band aralığı yakınındaki yapılarını şematik olarak gösteriyor. Bu yapılar elektron enerjisini, k 'nın bir fonksiyonu olarak veriyor ($\hbar k$ elektronun, klasik momentumun periyodik ağ içindeki karşılığı olan kristal momentumunu gösteriyor).

Bir yarıiletkenden band kenarında ışık yayını, bir elektronun dolu bir valans bandı konumundan boş bir iletkenlik bandına yükselip daha sonra geride valans bandında bulunan bir boş durum (ya da boşluk) ile birleşmesi (rekombinasyon) demektir. Uyarılmanın tersi olan duruma elektron-boşluk birleşmesi denir ve birleşme enerjisi bir foton olarak verildiğinde ışık yayını gözlenir. Genelde, birleşme sürecinin enerji ve kristal

mementumunu koruması gerekir. Bu koşul, klasik iki-cisim etkileşmesindeki enerji ve momentumun aynı anda korunmasına karşılık gelir.

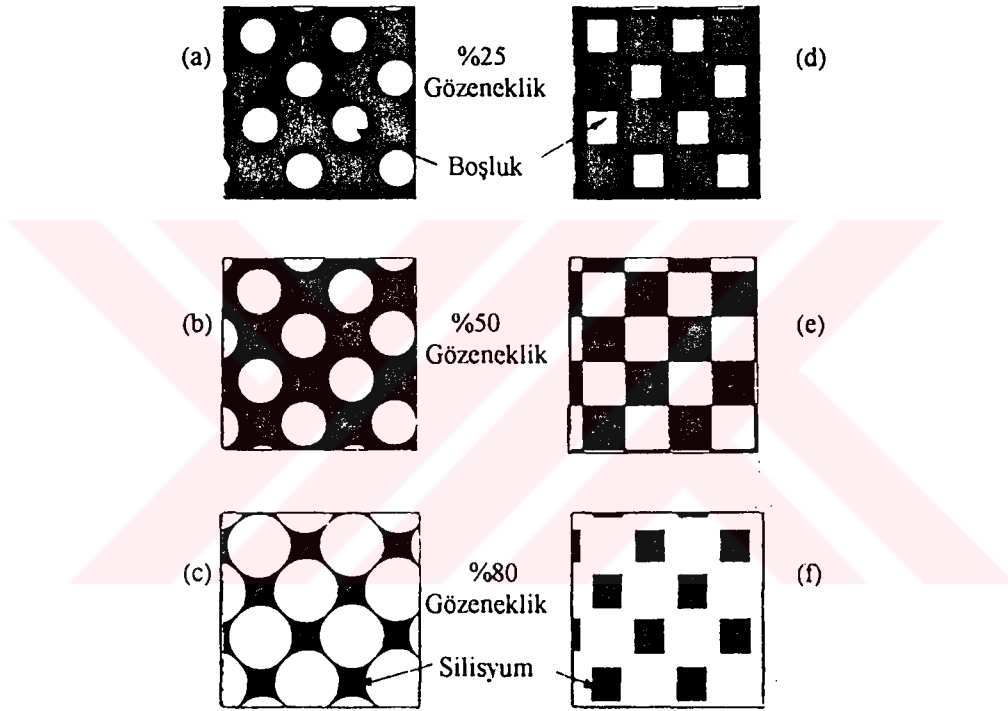


Şekil 1.7 (a) Doğrudan ve (b) dolaylı bir yarıiletkende band aralığı yakınındaki band yapısı (Collins vd., 1997)

Doğrudan aralıklı yarıiletkenlerde iletim bandının en düşük değeri ile valans bandının en yüksek değeri aynı k değerinde görünürler. Fotonun momentumu çok küçük olduğundan bir elektron-boşluk birleşmesinin sonucunda bir foton yayımı k değerini korur. Böyle yarıiletkenlerde optik süreçler oldukça güçlüdür, tersine dolaylı band aralıklı bir yarıiletkende iletkenlik bandı minimumu ile valans bandı maksimumu k uzayında değişik noktalarda bulunurlar. Yalnızca foton yayımı ve soğurulması yoluyla kristal momentumu korunamaz. Bir fotonun yayımı ile bir başka parçacığın örneğin fononun (örgü titreşimi) aynı anda yayımı ya da soğurulması k 'yı koruyabilirse de böyle süreçler ikinci mertebeden olup doğrudan bir optik birleşmeye göre çok daha az olasıdır. Bu nedenle, saf hacimli Si'dan ışık yayımının doğrudan aralıklı bileşik yarıiletkenlere göre çok daha zayıf olduğu ve bir foton ile k 'yı koruyan bir fononun eş zamanlı yayımını içerdiği gözlenir. Silisyumun tipik oda sıcaklığı verimleri % 0.001'den çok daha az iken tersine GaAs LED'lerin verimi %1-10 arasında olup özel LED'ler için %30'a yaklaşan verimler elde edilmiştir (Collins vd., 1997).

1.4.1 Gözenekli silisyumun yapısı

HF-kökenli çözeltiler içinde Si katmanlarının düşük akım yoğunluklarında anodizasyonu, yüzeye dik hareket eden oldukça küçük boşlukların dizinlerinin üretiminde kullanılabilir. Hacimli silisyum, altlık özdirencine ve anodizasyon koşullarına bağlı olarak mikrogözenekli (gözenek genişliği $< 20 \text{ \AA}$), mezogözenekli (gözenek genişliği $20-500 \text{ \AA}$) veya makrogözenekli (gözenek genişliği $>500 \text{ \AA}$) olarak yapılabilir (Canham, 1990).

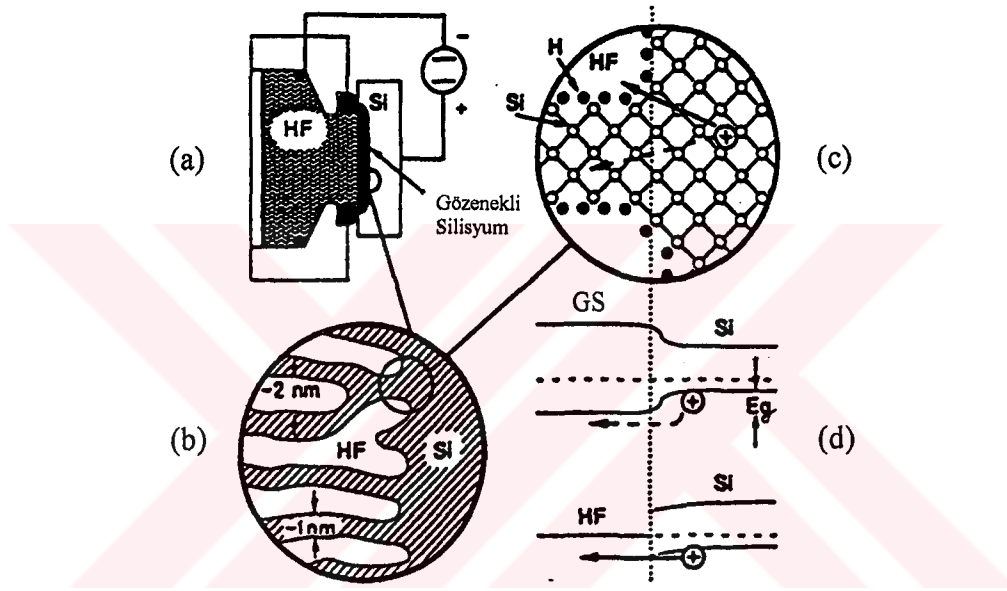


Şekil 1.8 Silindirik boşlukları (a)-(c) ve dikdörtgen boşlukları (d)-(f) içeren anodize edilmiş (100) Si katmanının idealleştirilmiş görünüşü (Canham, 1990)

Şekil 1.8(a), gerçekten düşük gözenekli (%25) bir tabakanın anodize edilmiş (100) yüzeyinin idealleştirilmiş şeklini gösterir. Elde edilen veriler düşük gözenekli mezogözenekli silisyumun yüzeye dik hareket eden sabit yarıçaplı etkileşmeyen silindirik gözenek dizinlerini içeren hacimli malzemeye yeterince yaklaşık olabileceğini gösterir. Şekil 1.8(b) ve 1.8(c), kimyasal çözünme ile her gözeneği büyüten aşındırıcı ile tabakanın gözenekliliğinin arttığını gösterir. Silindirik gözenekler için, %78.5'den büyük gözeneklilik, en yakın komşu gözeneklerin mevcut birleşmesini ve sonuç olarak Si sütunlarının yoğunluğunun fiziksel

izolasyonunu sağlar. $\sim 80\%$ 'lik gözeneklilikte bu sütunların genişliği ortalama gözenek yarıçapı ile kıyaslanabilir.

Eğer kristalografik etkiler mikrogözenek ve mezogözenek şekiller üzerine etki ederse, anodize edilmiş (100) katmanları için gözenekler Şekil 1.8(a) - 1.8(c)'de gösterildiği gibi dairesel değil, Şekil 1.8(d) - 1.8(f)'deki gibi kare olacaktır. Düzgün dikdörtgen gözenekler dizini için Si sütunlarının fiziksel olarak izole olduğu en düşük gözeneklilik, Şekil 1.8(e)'de gösterildiği gibi sadece $\sim 50\%$ dir (Canham, 1990).



Şekil 1.9 (a) Gözenekli Si üretiminin şeması, (b) ve (c) gözenek yakınında anodik aşındırmadaki kimyasal süreç, (d) gözenekteki ve hacimli ve gözenekli Si arasındaki Si-elektrolit geçişi için band diyagramı (Kanemitsu, 1995)

Şekil 1.9, gözenekli Si üretim hücresi ile gözenekteki ve gözeneğe yakın anodik aşındırmayla ilgili özel süreçlerin şemasını gösterir. Boşlukların, Si'un elektrokimyasal çözünme süreci için gerekli olduğu gerçeğine dayanır. Kuantum sınırlama olayından ötürü, gözenekli Si'daki band aralığı hacimli Si'unkine kıyasla arttığından boşluklar, gözenekli tabakaya girmek için ek bir E_g enerjisine ihtiyaç duyarlar (Şekil 1.9(d)). E_g , uygulanan gerilimden büyükse gözenekli tabaka boşluklardan arınmış olur ve ileri derecede çözünme sona erer. E_g , nanokristallerin boyutunun bir fonksiyonu olduğundan, gerilim oluşumunun artması band aralığı enerjisinin artmasına ve gözenekli tabakadaki kristal boyutunun

azalmasına neden olduğu sonucuna varılabilir. Bu süreç, kendi kendine ayarlanabilir bir süreçtir. Kuantum sınırlama olayı nanokristallerin boyutunu sınırlar (Kanemitsu, 1995).

Si nanokristallerinin boyut ve şeklinin hazırlama koşullarına bağlı olduğu Kanemitsu (1995) tarafından bildirilmiştir. Ayrıca, gözenek yapısının, Si katmanının (n- veya p-tipi, öz direnç) tipine ve anodizasyon parametrelerine de (HF konsantrasyonu, akım yoğunluğu, aydınlatma v.s.) bağlı olduğunu belirtmiştir.

Aydınlatma, gözenekli tabakada boşlukları yaratır. Uygulanan alan altında, aydınlatma gözenekli yapının ileri derecede çözünmesini sağlar. O zaman, aydınlatma altında nanokristallerin boyutu kontrol edilebilir. Aydınlatma ile n-tipi Si katman üzerinde gözenekli Si tabaka oluşturulur. Elektrokimyasal aşındırma sırasında aydınlatma dalgaboyu değiştirilerek, n-tipi gözenekli Si tabakanın fotoluminesans dalgaboyu da kontrol edilebilir (Kanemitsu, 1995).

Gözenekli silisyum tabakaları derinliklerinin her yerinde tam olarak homojen değildir. p-tipi altlıklar üzerindeki gözenekli silisyumun elektrokimyasal oluşumu sırasında, tabakaların mikroyapısı ve gözenekliliği derinlikle değişir; ya silisyum nanokristallerinin boyutunu azaltan ek kimyasal aşındırma süreci (Smith ve Collins, 1992; Halimaoui, 1994) ya da gözenekliliği artıran HF konsantrasyonunun kalınlıkla azalması buna sebep olarak verilebilir (Herino vd., 1987; Bomchil vd., 1989; Lehmann, 1993). Kimyasal aşındırma süreci ile çözünen silisyum miktarı gözenekli silisyum tabakanın yüzey alanına ve toplam aşındırma zamanına bağlıdır. HF konsantrasyonunun azalması Fick kanunu ile HF moleküllerinin akısına bağlıdır.

$$F_{HF} = D_{HF} \cdot \frac{C_{üst} - C_{alt}}{d} \quad (1.8)$$

Burada; C_{alt} ve $C_{üst}$, gözenekli silisyum tabakanın alt ve üst kısmındaki HF konsantrasyonları, d tabaka kalınlığı, D_{HF} difüzyon katsayısı ve F_{HF} HF moleküllerinin akısıdır. Sabit bir tabaka kalınlığı için, HF konsantrasyonunun tabakanın üst kısmından alt

kısmına doğru azalması, HF moleküllerinin daha yüksek akısı yani gözenekli silisyum oluşumu sırasında yüksek akım yoğunlukları için daha büyüktür.

HF konsantrasyonunun azalmasına bağlı olan derinlik gradyentleri, yüksek akım yoğunluklarının uygulanması gereken yüksek gözenekli silisyum durumunda beklenir (Thonissen vd., 1996).

1.4.2 Gözenekli silisyumun büyütülme yöntemleri

Gözenekli silisyumun temel oluşma mekanizması hala aktif olarak çalışılmaktadır. John ve Singh'in (1995b) bildirdiğine göre, yapılan bir çalışmada (Canham, 1990), gözenekli silisyum, %48 HF içinde p-tipi silisyumun anodizasyonu sırasında oluşturuldu. Gözeneklilikleri %60-80 arasında olan örneklerin görünür bölgede lüminesans verdikleri bulundu. 1991 yılında, Searson tarafından kalınlıkları 500 μm 'ye kadar olan gözenekli silisyum filmler bu metotla üretildi. Değişen gözenek morfolojileri katkı, anodizasyon potansiyeli ve HF konsantrasyonu gibi parametrelere bağlı olarak elde edildi (Beale vd., 1985). Noguchi ve Suemuene (1993), n-tipi silisyumda gözenek oluşumunun sadece aydınlatma altında oluştuğunu bildirdiler. Yüksek anodik potansiyellerde veya düşük HF (<%20) konsantrasyonlarında ise gözenek oluşumunun elektroparlatmaya neden olduğunu rapor ettiler (Beale vd., 1985).

Lehmann ve Gosele'nin (1991) yaptığı çalışmada ise, bütün gözenekli silisyum tabakaları, bir güç kaynağı ve platin elektrot kullanarak 1:1 (%98 etanol:%48 HF) oranındaki elektrolit içinde büyütüldü. Örnekler, gözenekli silisyum oluşumu sırasında karanlıkta tutuldu. Gözenekli silisyum tabakalarının optik soğurulmasını ölçmek için taşıyıcıdan yaklaşık 100 μm 'lik tabakalar ayırmak gerektiğini belirttiler.

Lehmann ve Gosele (1991), tek kristalli silisyum (5 Ωcm öz dirençli, bor katkılı, parlatılmış yüzey) üzerinde gözenekli silisyum tabakaları, Turner (1958) tarafından kullanılan sisteme benzer olarak büyüttü (55mA/cm², 45 dak.). Bu çalışmada, gözenekli silisyum tabakanın, elektrolit konsantrasyonu %1 sulu HF'ye indirilerek ve elektroparlatma (10s için

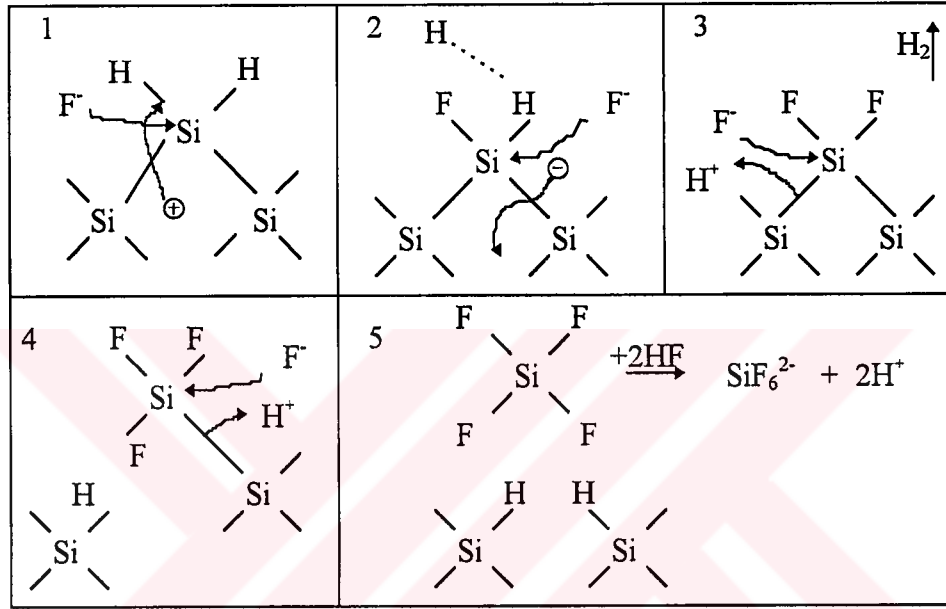
100mA/cm²) ile silisyum altlıktan kolaylıkla ayrılabilceğini bildirdiler. Gözenekli silisyum tabakanın (110µm kalınlığında), açık havada kolaylıkla kırılabilceği için su veya etanol içinde tutulması gerektiğini belirttiler. Az katkılı altlıklar üzerinde büyütülen gözenekli silisyum tabakaların, altlıktan ayrıldıktan sonra renginin, koyu kırmızıdan açık turuncuya doğru yarı saydam olduğunu gözlediler (Lehmann ve Gosele, 1991).

Chan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise, serbest-duran (free-standing) gözenekli silisyum filmler, HF(%48):etanol karışımı içinde (hacimce 3:1), 30 dakika, (100) yönelimine sahip bor ve fosfor katkılı (öz direnci 0.01Ωcm) silisyum katmanlarının anodik olarak aşındırılması ile hazırlanmıştır. Akım yoğunlukları 5-100mA/cm² arasında bulunmuştur. Gözenekli silisyum filmleri, 0.5 A/cm² akım yoğunluğu ile HF:etanol karışımı (hacimce 1:7) içinde elektroparlatma ile altlıktan ayrılmıştır. Bütün gözenekli silisyum filmleri etanol içinde çalkalanmış ve atmosfer ortamında kurutulmuştur. Serbest gözenekli silisyum filmlerin kalınlıkları 10-180µm ve gözeneklilik %33-75 arasında bulunmuştur (Chan vd., 1996).

Kanemitsu da (1995), gözenekli Si'un optik özelliklerinin ölçülmesi için serbest-duran (free-standing) gözenekli Si tabakalar hazırlamaya gerek olduğunu belirtmiştir. Altlıklar, (100) yönelime sahip, öz direnci 0.01'den 230Ωcm'ye değişen p-tipi Si katmanlardır. İyi omik kontakt oluşturmak için katmanların arka yüzeyine ince Al filmleri buharlaştırılmıştır. Anodizasyon, 10-30mA/cm² akım yoğunluğunda, HF-etanol çözeltisi içinde (HF:H₂O:C₂H₅OH = 1:1:2) 5-60 dakika için yapılmıştır. Anodizasyondan sonra, akım yoğunluğu keskin olarak 700mA/cm² ye artırılmış ve kristal silisyum altlıktan elektrokimyasal olarak gözenekli silisyum tabaka ayrıldığı gözlenmiştir. Gözenekli silisyum filmleri C₂H₅OH çözeltisi içine konulmuştur. Filmlerin kalınlıklarının 20-40µm arasında olduğu bulunmuştur.

Gözenekli silisyum tabaka oluşumunu anlamak için hidroflorik asit içinde anodik olarak kutuplanan silisyumun çözünme kimyasına değinmek gereklidir. Silisyum yüzeyinin düşük OH⁻ konsantrasyonlarına karşılık gelen düşük pH değerlerindeki HF asitin etkisine karşı tepkisiz olduğu bilinmektedir. Eğer silisyum anodik kutuplanırsa, gözenekli silisyum tabaka

(GST) oluşumu, reaksiyonun elektrolit içindeki iyonik difüzyon ile değil elektrodun oluşturulduğu yüklerle sınırlandırıldığı sürece gözlenebilir. Bu koşul, HF konsantrasyonuna bağlı kritik akım yoğunluğundan (J_{GST}) düşük akım yoğunlukları için sağlanır. GST'nin iç yüzeyinin hidrojen ile kaplandığı görüldü. Çözünme mekanizması Şekil 1.10'da gösterilmiştir. 1-5 aşamaları F, H, Si, boşluklar ve elektronları ilgilendiren tepkimelerin sırasını göstermektedir.



Şekil 1.10 Gözenekli silisyum oluşumu için HF asit içindeki silisyum elektrotların çözünme mekanizması (Lehmann ve Gosele, 1991)

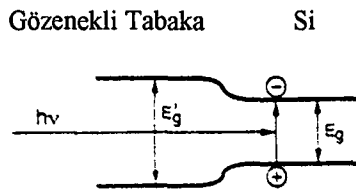
GST oluşumu için hidrojen ile doymuş olan silisyum yüzeyinin, silisyum elektrodunda elektronik bir boşluk (h^+) olmaması durumunda flor iyonlarına karşı tepkisiz kalması önemlidir, çünkü H 'nin elektronegatifliği yaklaşık olarak Si 'unki kadardır ve indüklenen polarizasyon düşüktür. Eğer bir boşluk (h^+) yüzeye ulaşırsa flor iyonları tarafından, $Si-H$ bağları üzerinde çekirdekteki parçacıklara eğilimli bir tür akın oluşur ve $Si-F$ bağı kurulur (Şekil 1.10, 1. aşama). Bağlanmış F 'un polarize etkisinden dolayı başka bir F^- iyonu da gelebilir ve H_2 molekülünün oluşumu ve bir elektronun elektroda sokulması yardımıyla bağ yapabilir (2. aşama). $Si-F$ gruplarının oluşturduğu indüklenmiş polarizasyondan dolayı $Si-Si$ arka bağlarındaki elektron yoğunluğu azalır ve bu zayıflamış bağlara HF veya H_2O , (4. ve 5. aşama) silisyum yüzey atomları hidrojene bağlı kalacak şekilde bağlanırlar (5. aşama). Eğer bir silisyum atomu, bu reaksiyon ile atomik olarak düz yüzeyden uzaklaştırılırsa, atomik

boyutta bir eğim oluşur. Yüzey geometrisindeki bu değişiklik, bu noktada bir boşluk (h^+) aktarımını seçecek şekilde elektrik alan dağılımını değiştirecektir. Böylece, yüzeydeki düzensizlikler büyür. Yaklaşık $1\mu\text{m}$ 'lik gözeneklerin bu süreçle, parlatılmış n-tipi silisyum yüzeyleri üzerinde birkaç dakika içinde oluşabileceği gösterilmiştir. Gözenekler arasındaki duvarlar boşluklardan (h^+) arındırılırsa, çözünmeye karşı korunmuş olacaklardır (Lehmann ve Gosele, 1991).

Şekil 1.11'de şematik olarak gösterildiği gibi gözenekli silisyumun enerji aralığı tek kristalli silisyumunkinden büyüktür. Gelen ışığın foton enerjisi gözenekli tabakanın enerji aralığından küçük olduğu zaman, gözenekli tabaka saydamdır ve elektron-boşluk çiftleri gözenekli tabakanın arayüzeyine yakın tek-kristalli silisyumda üretilir. Bu, gözenek oluşması için üretilen boşlukların arayüze geçmesini sağlayacaktır. Gelen ışığın foton enerjisi gözenekli tabakanın enerji aralığından büyük olduğu zaman, elektron-boşluk çiftleri gözenekli tabakada üretilir. Bu, gözenekli tabakanın çözünmesine neden olur. Dalgaboyu bağımlılığının bu açıklaması, anodizasyon sırasında gözenekli tabakanın oluşma mekanizması olarak tasarlanan kuantum sınırlama modeli ile uyumludur (Noguchi ve Suemune, 1993).

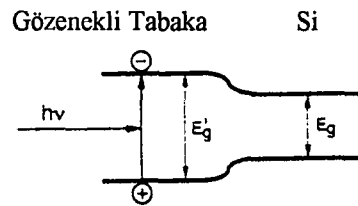
Gözenekli Tabaka Oluşumu

$$(E_g < h\nu < E'_g)$$



Gözenekli Tabaka Çözünmesi

$$(h\nu > E'_g)$$



Şekil 1.11 Elektron-boşluk çiftleri oluşturmak için tabakanın foton enerji ilişkisini göstermek üzere gözenekli tabakanın şematik kuantum sınırlama modeli (Noguchi ve Suemune, 1993)

Xu ve arkadaşlarının (1992) belirttiğine göre, Canham ve arkadaşları (1991), gözenekli silisyumun yaşlanması olayını da çalışmışlardır. Örnekleri bir yıl civarında açık havada bıraktıklarında fotoluminesans yayılım şiddetinin azaldığını gözlemişler ve bu olayı da silisyum yüzeylerindeki oksit tabakalarının artmasına bağlamışlardır (Canham vd., 1991).

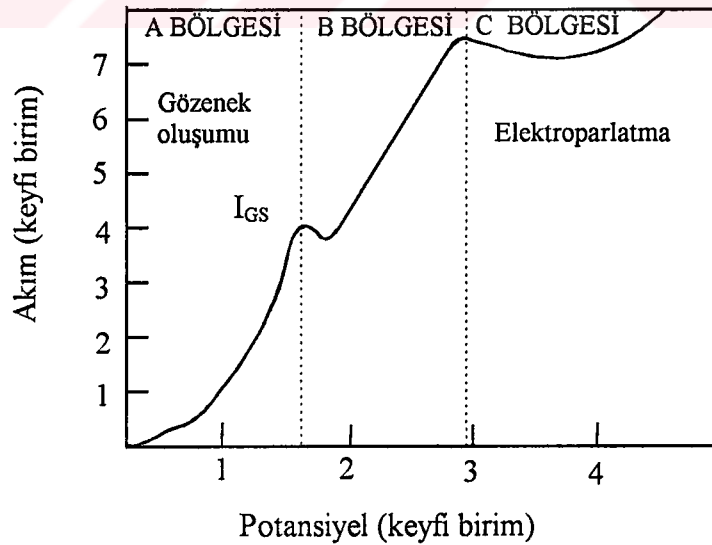
1.4.3 Gözenekli silisyum büyütme mekanizmaları

Gözenekli silisyumda, gözenek oluşumunu açıklamak için ileri sürülen birbirinden bağımsız üç farklı model vardır:

a) Beale modeli

Silisyumda gözlenen karmaşık gözenek yapıları arasında ilişki kurmak için son on yılda çok sayıda model öne sürüldü. Bunların en önemlisi belki de *Beale modeli*'dir (Beale, 1985). Model, gözenekli Si oluşması için Si anot olmak üzere, bir akım geçişinin gerekli olduğunu varsayıyor. p-tipi silisyumda Si-HF sistemi ileri kutuplanacağından bu kolaylıkla mümkündür. Fakat ters kutuplama altındaki n-tipi silisyum için akım geçişi şiddetli aydınlatma veya bozulmaya neden olabilecek yüksek gerilimler gerektirir. Silisyumdaki akım geçişi yüzey homojensizliklerinin sonucu olarak yerel şekilde ortaya çıkar. Bu, gözeneklerin oluşumunu başlatarak yüzeyin düzgün olmayan çözünmesine yol açar.

Gözenekli silisyum oluşumunun ilk modellerinin çoğu çözünme süreçleri sırasındaki I-V karakteristiklerine dayanır (Şekil 1.12).



Şekil 1.12 HF içinde p-tipi silisyumun anodizasyonu için tipik I-V karakteristiği (John ve Singh, 1995a)

Şekildeki üç bölge, gözenek oluşma rejimini, geçiş bölgesini ve elektroparlatma rejimini göstermektedir. Silisyum - HF sistemleri için genel I-V davranışı kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

(i) I akımı, ilk tepe değeri I_{GS} 'den az olduğu zaman gözenekli silisyum oluşumu A bölgesinde görünür. B bölgesi, C bölgesi olarak gösterilen elektroparlatma rejimine geçiş bölgesidir.

(ii) Si anot olduğu zaman, sistem p-tipi silisyum için ileri kutuplanır, oysa n-tipi silisyum için ters kutupludur. Doğrultma davranışı her iki durumda da gözlenir.

(iii) Aydınlatma altında n-tipi ve p-tipi Si, benzer I-V karakteristikleri gösterir. Yoğun katkılanmış yarıiletkenler için, karakteristikler karanlık koşullardakine benzerdir (John ve Singh, 1995a).

b) Sınırlı yayılma modeli

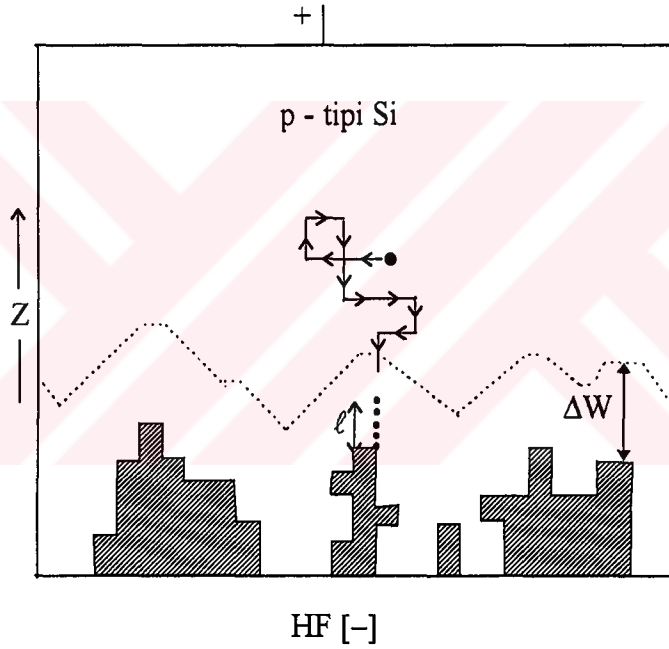
Sınırlı yayılma modeli, gözenekli silisyum oluşumunu gelişigüzel hareket cinsinden tanımlar. Gözenek oluşumu sırasında boşluklar, silisyum yüzeyine yayılır ve silisyum yüzey atomları ile oksidasyon yaparak tepkimeye girer. İnjekte edilen elektronlar difüzyonla silisyum yüzeyinden ayrılırlar. Gelişigüzel hareketin doğası, gözenek uçlarını, yarıiletken hacimli örneğinden yayılan bir parçacık için en olası kontakt noktası olarak gösterir ve Beale modelinde olduğu gibi yüzey düzensizliklerinde benzer seçici çözünme gösterir. Katkı konsantrasyonu, gerilim v.b.'nin fonksiyonu olan karakteristik yayılma uzunluğu farklı gözenek yapılarını kontrol eder.

Sınırlı yayılma modelinin temel üstünlüğü, standart yayılma fiziğini kullanan yapısıdır. Beale modelinden farklı olan sınırlı yayılma modelinin özellikleri diyotlarla kısıtlı değildir ve elektrokimyasal olaylara her yerde uygulanır. Silisyum - çözelti arayüzeyinde tepkimeye girenlerin tüketimiyle (ürünlerin üretimi) doğal olarak yarıiletkende arınma ortaya çıkarır. Bununla birlikte, gözenekli silisyum oluşumunu tanımlamak için diyod benzerliği kullanılırsa, ileri-kutuplu p-n diyotlarında sınırlama akımını ve arınma bölgesinden çok

Schottky diyotlarının yarıiletken kısmını tanımlamada yayılmayı düşünmek daha uygundur (Smith ve Collins, 1992).

Temel aşındırma , başlıca (i) hacimli örnekten HF-Si arayüzeyine doğru boşlukların yayılması ve (ii) sonlu bir tükenme olasılığı ile çözünme konumundan bir gözeneğin daha fazla yayılması ile kontrol edilir (Şekil 1.13) (John ve Singh, 1995b).

Örgüde üretilen bir boşluk, yüzeyin etkileştiği bir (ℓ) uzaklığı içinde olan bir konuma yaklaşıncaya kadar yayılma hareketine uğrar. Böylece, yüzeye kadar alanla sürüklenir ve çözünme görülür.



Şekil 1.13 Gözenekli silisyum oluşma mekanizmasının görünümü (John ve Singh, 1995b)

Şekil 1.13’de, p-tipi altlıktaki boşluk (dolu daire) HF elektrolitine doğru yayılır ve bir yüzey konumunu aşındırır. Kırık çizgi, arayüzeyden ΔW uzaklığındaki arınma bölgesini, taralı alan gözenekleri, ℓ (noktalı çizgi) sürüklenme-yayılma uzaklığını gösteriyor. Altlık, HF elektrolitine göre pozitif potansiyelde tutulur.

Boşluklar, arınma bölgesi genişliğinin (ΔW) ötesinde, örgü kenarlarında düzgün olasılıkla üretilir. Bir yüzey konumu, eğer boşluğun sürüklenme-yayılma uzaklığı ℓ içinde

bulunuyorsa, boşluk o noktaya doğru hareket eder ve çözünmeye neden olur. Eğer ℓ yarıçaplı çember içinde hiç yüzey noktası bulunmuyorsa, boşluk, en yakın komşu noktaların birine doğru gelişigüzel hareket eder. Bu, yüzeyin ℓ yarıçapı içinde bir konuma yayılana kadar tekrarlanır. Sonra gözlenen yüzey konumunu çözmeye başlar. Eğer boşluk, arayüzeyden $3\Delta W$ uzaklığı ötesinde başıboş dolaşıyorsa, o boşluk yok edilir ve başka biri üretilir (John ve Singh, 1995b).

c) Kuantum sınırlama modeli

Kuantum sınırlama modeli, Lehmann ve Gosele tarafından önerildi (Lehmann ve Gosele, 1991; Lehmann vd., 1993; Lehmann, 1992). Temel fikir, silisyumun çözünmesi sırasında oluşan nanoyapılarda yükün sınırlanmasının sonucu olarak bir band-aralığı artışının gözlenmesidir. Sadece enerjileri bu engeli aşacak kadar yüksek olan taşıyıcılar, kristalde bulunabilir. Bu, gözenekli yapıda boşluk arınması ile sonuçlanır. Boşluklar çözünme için önemli olduğundan daha ileri aşındırma oluşmaz.

Basit arınma tipi modeli, gözenekli silisyum filminin duvar kalınlığında bir üst limit belirlemektedir. Benzer şekilde, kuantum sınırlama etkisi kristal büyüklüğünde daha düşük sınırları ayarlamaktadır. Lehmann ve Foll'a göre (1990), n-tipi silisyumda oluşan makrogözenekler, gözenek kenarlarında mikrokristaller ile kaplanır. Bu mikrokristallerin büyüklüğü kuantum sınırlama ile saptanır. Bununla birlikte, n-tipi gözenekli silisyumun bu görünümünün kesin doğru olmadığını gösteren başka yazılar da vardır (Smith ve Collins, 1992).

Kuantum sınırlama modelinin, gözenekli silisyum için temel mekanizma olarak dikkate alınmadığı bellidir. Kristal büyüklüğünde daha düşük sınırı koyma ikincil etkidir. Genişliği, sonuçta oluşan şekli büyük ölçeklerde denetleyen gözenekli silisyum oluşumunun başlangıcı için arınma bölgesi gerekli gibidir. Bununla birlikte, p-tipi silisyumda, uzay yük bölgesinin çok küçük bir genişlikte olduğu ve böylece kuantum sınırlama olaylarının önemli bir rol oynadığı öne sürülebilir (John ve Singh, 1995a).

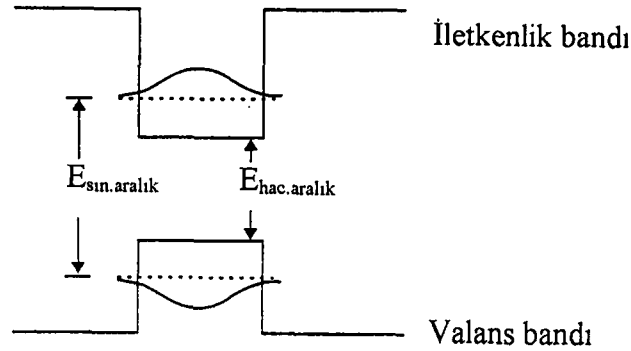
Son zamanlarda, gözenekli silisyumun kuantum açısından değerlendirilmesine ilgi doğmuştur. Gözenekli silisyumun kuantum doğası ile ilgili bu yoğun araştırma için etkili neden bir gün optoelektronik bir gereç olarak kullanılması olasılığıdır. İlk olarak, p-tipi silisyumda oluşturulan gözenekli silisyumun EM (elektromagnetik) spektrumun görünür bölgesinde anormal büyüklükte fotolüminesans gösterdiği bulundu. Silisyum, 1,1eV'luk dolaylı band-aralığına sahip bir yarıiletken olduğundan, görünür bölgedeki şiddetli ışık emisyonu şartıydı ve fotolüminesansı açıklamak için bilinen gözenekli silisyum "tellerinin" mikroskopik boyutlarının neden olduğu kuantum olayı öne sürüldü. Gözenekli silisyum yapısı *kuantum teller* veya *kuantum noktalar* olarak adlandırılır.

Gözenekli silisyumun fotolüminesansı bol bol gösterilmiş olsa da, silisyumdaki fotolüminesans mekanizması için daha kesin bir açıklama getirilmemiştir. Genel olarak kabul edilen açıklama, ince silisyum telleri içinde yük sınırlamasının, silisyumu görünür bölgeye itecek ve daha önemlisi band aralığında doğrudan bir rekombinasyon olasılığını artıracak şekilde, silisyumun band aralığında bir artmaya neden olacağı şeklindedir.

Lehmann ve Gosele (1991), optik absorpsiyon kanıtlarını, öne sürülen mekanizmayı destekleyerek, p-tipi silisyumda band aralığı enerjisinin yaklaşık 1.5 eV'a artması ile sağladılar. Bunlara ek olarak, silisyum "tellerinin" kalınlığı azalırken, fotolüminesans spektrumundaki tepe noktasının maviye doğru değiştiği gösterildi (Lehmann ve Gosele, 1991; Gardelis vd., 1991) ve doğrudan yük sınırlaması için son kanıt gözenekli Si ve gözenekli SiGe için sağlandı (Gardelis vd., 1991). Ayrıca, Tsai ve grubu (1991) yüzey kimyalarının yani, hidrojen adsorpsiyonunun fotolüminesansı etkilediğini gösterdi.

p-tipi silisyumda gözenekler arasındaki ortalama uzaklık, elektronlar için kuantum olaylarının beklenildiği büyüklük, yani 10Å' ler düzeyindedir. Silisyum "tellerinin" ortalama kalınlığı tam olarak özel anodizasyon koşulları ile kontrol edilir ve bunlara ek olarak, HF içinde yavaş kimyasal aşındırma veya elektrokimyasal oksidasyon ile kalınlıkları daha da azaltılabilir. Silisyum tellerin kalınlığının az olduğu p-tipi silisyumun oluşumu sırasında, kuantum etkiler çok olası ise de kuantum olaylarının, p⁺-Si veya gözenekler arası boyutların birkaç mikrometre kadar yüksek olduğu n-Si'da gözenek oluşumu düzenlemesi olası değildir (Smith ve Collins, 1992).

Şekil 1.14, bir yarıiletken kuantum kuyusunun şemasını göstermektedir. Burada, iletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki boşluklar potansiyel engelleri (örneğin bir nanokristalin yüzeyleri tarafından) tarafından uzaysal olarak sınırlandırılmıştır. Elektron ve boşlukların sınırlandırılmasının sonucu olarak valans bandından iletkenlik bandına en düşük enerjili optik geçişin enerjisi ve dolayısıyla band aralığı artar.



Şekil 1.14 Tek boyutlu yarıiletken kuantum kuyusunun şematik diyagramı
(Collins vd., 1997)

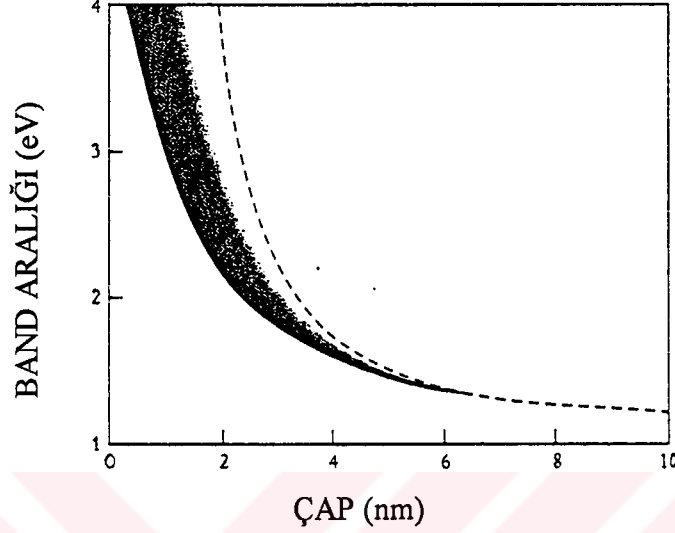
Basit etkin-kütle yaklaşımı ile sınırlandırılmış enerji aralığı,

$$E_{\text{sin.enj.aralığı}} = E_{\text{hac.enj.aralığı}} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2} \left[\frac{1}{\omega_x^2} + \frac{1}{\omega_y^2} + \frac{1}{\omega_z^2} \right] \cdot \left[\frac{1}{m_i^*} + \frac{1}{m_v^*} \right] \quad (1.9)$$

bağıntısı ile verilir. m_i^* ve m_v^* sırasıyla iletkenlik ve valans bandlarının etkin kütleleridir. ω_x , ω_y ve ω_z bir kutu olarak kabul edilen sınırlandırılmış bölgenin boyutlarıdır. Sınırlandırılmış band aralığının boyutu kristalin karakteristik boyutları azaldıkça artar.

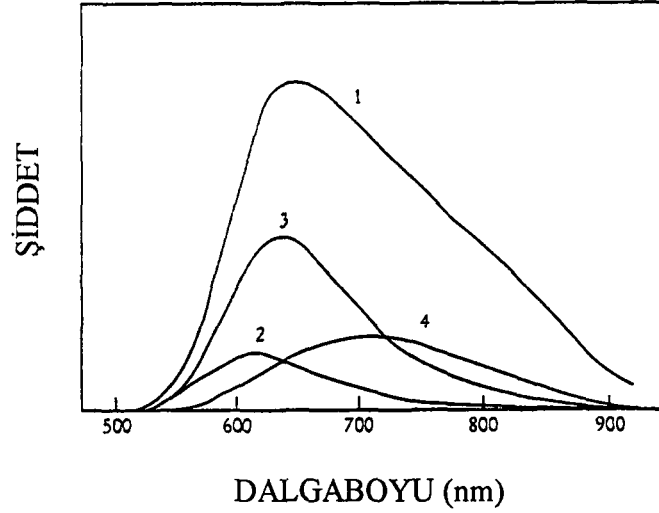
Şekil 1.15, (1.9) formülünü kullanarak silisyum nanoparçacığın karakteristik boyutunun bir fonksiyonu olarak optik band aralığının hesaplanmasını göstermektedir. Kabaca 3nm boyutlu bir parçacık için görünür spektrumun kırmızı kısmında 2eV yakınında bir geçiş enerjisi bulunur. Gerçekte, geçiş enerjisini hesaplamak için bu yaklaşım çok basittir. İletkenlik bandının parabolik olmamasını, valans bandının detaylı şeklini, komşu bandların etkisini ve eksitonik katkıları ihmal etmektedir. Bazı gruplar (Read vd., 1992; Buda vd., 1992; Delerue vd., 1993; Yeh vd., 1994), daha detaylı hesaplamaların sonuçlarını

yayınladılar. Tahmin edilen band aralığı, modellerin detaylarına duyarlı olmasına rağmen, Şekil 1.15'deki taralı bölge içine düşme eğilimi gösteren sonuçlar, yukarıda tartışılan etkin-kütle modelinin verilen bir parçacık boyutu için band aralığını aştığını göstermektedir. 2eV enerjili bir optik geçiş, boyutları 2.0-2.5nm olan kristallerden olabilir.



Şekil 1.15 Kristal boyutunun fonksiyonu olarak silisyum nanokristalinin enerji aralığı (Collins vd., 1997)

Kuantum sınırlama modelini test etmeye yönelik ilk adım, bu boyuttaki kristallerin, filmlerin büyük bir oranını oluşturup oluşturmadığını belirlemektir. Eğer böyle olduğunu kabul edersek, nanokristallerin boyutları değiştikçe optik geçiş enerjisinde değişimler gözlemek model için olumlu bir kanıt olacaktır. Canham'ın orjinal makalesinde (1990) bu olay için dolaylı bir kanıt sağlanmıştır. Aynı zamanda, lüminesans enerjisinin daha uzun aşındırma zamanı ile arttığı gözlenmiştir. Eğer uzun aşındırma zamanı daha küçük nanokristallere yol açıyorsa, boyutun lüminesans enerjisi ile ilişkili olduğunu söyleyebiliriz. Bu sonuç, bir öneri olmasına rağmen uzun aşındırma zamanının film özelliklerindeki hidrojen veya oksijen miktarı veya yüzey kusurlarının yoğunluğu gibi başka değişimlerle ilişkili olması mümkündür.



Şekil 1.16 Ortalama kristal boyutu ile fotolüminesans şiddeti arasındaki ilişki
(Collins vd., 1997)

Bu zorluklara rağmen, yapı büyüklüğü ile enerji arasında ilişki kurmada ilerlemeler olmuştur. Bu alanda bazı ilginç sonuçlar, 10nm'den küçük boyutlu silisyum nanokristallerini kimyasal olarak sentezlemeyi başarmış başka araştırmacı gruplarından gelmiştir (Wilson vd., 1993; Schuppler vd., 1994). Nanokristallerden özellikleri gözenekli silisyumunkine benzer verimli görünür fotolüminesans elde edilmiştir. Bu, nanokristallerdeki fotolüminesans için bir açıklamanın gözenekli silisyum filmlere de uygulanabileceğini gösterir. Bu nanokristaller geniş boyut dağılımlarına sahiptirler. Wilson ve arkadaşları (1993), nanokristalleri büyük veya küçük ortalama parçacık boyutlu farklı gruplara ayırmak için sıvı kromatografi metodunu kullandı. Şekil 1.16, yayılım spektrumunun yüksek enerjilere değiştiğini ve ortalama parçacık boyutunun azaldığını gösterir. Şekildeki 1 spektrumu silisyum nanokristallerin dağılımından oluşan ve 2-4 spektrumları ise nanokristaller, boyutları kullanan sıvı kromatografi metodu ile ayrıştırıldıktan sonra elde edilen fotolüminesansları göstermektedir. Bir başka araştırmacı grubu, kristal boyutunu belirlemek için X-ışını absorpsiyon çalışması yaptı. Lüminesans pik enerjisi arttığında kristal boyutunun azaldığını tekrar gösterdiler (Schuppler vd., 1994).

Kuantum sınırlama modeli, gözenekli silisyumdan ışık yayılımını anlamak için büyük ilgi uyandırmasına rağmen başka açıklamalar da ileri sürüldü. Gözenekli silisyumun geniş yüzey alanı ve yüzey koşullarına karşı optik verimliliğinin duyarlılığı, ışık yayılımının moleküler bir yapıdan veya kusur merkezli olduğunu düşündürmüştür. Örneğin, yeni hazırlanmış

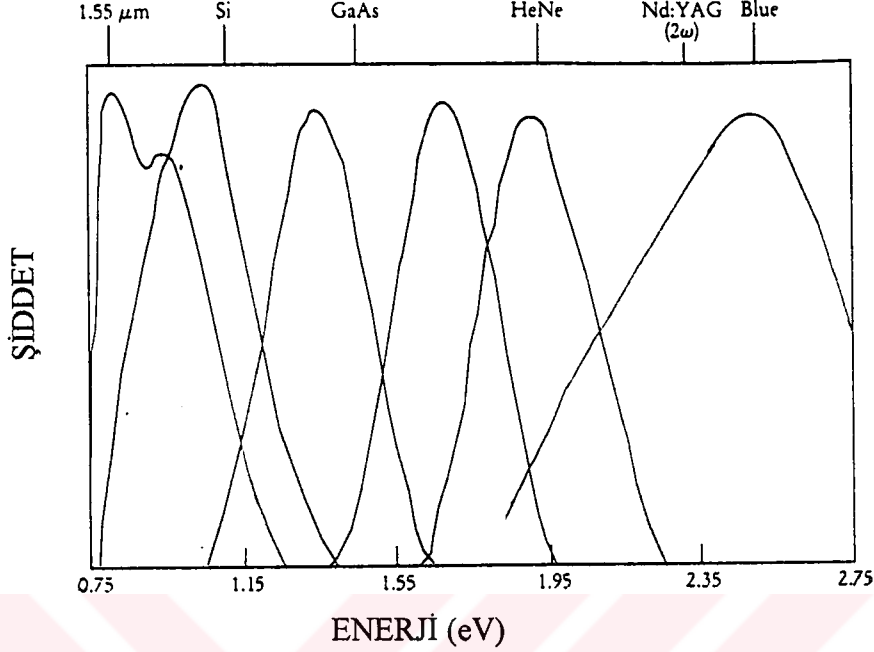
malzemedeki yüksek hidrojen konsantrasyonu, lüminesansa silisyum-hidrojen alaşımının neden olduğunu ortaya koydu. Diğer ilginç bir açıklama, anodizasyon sırasında silisyum yüzeyi üzerinde üretilen silisyum-kökenli bir bileşik olan siloxene ($\text{Si}_6\text{O}_3\text{H}_6$) üzerinde başlatılmıştır. SiO_2 -ilişkili kusur merkezleri de diğer önerilen lüminesans mekanizmasıdır. Yeni hazırlanmış gözenekli silisyumdaki farkedilir miktardaki oksijeni veya hızlı bir şekilde termal olarak okside olmuş gözenekli silisyumda hidrojenin eksikliği bu açıklamalara aykırıdır.

Gözenekli silisyumda lüminesansı açıklamak için bir model bulmak amaçlansa da net bir açıklık getirilememiştir. Yukarıda verilen kuantum sınırlama modelinin açıklamalarında optik band aralığı ve lüminesans yayılım enerjisinin hemen hemen aynı olduğu kabul edilmiştir. Işık yayılımı kusur durumlarından oluşursa bu geçerli bir tahmin olmayabilir. 1993 yılında Koch, saf kuantum sınırlama modeliyle uyumlu genişletilmiş bir model öne sürdü. Bu modelde soğurma, silisyum nanoparçacıklarının kuantize durumlarında meydana gelmektedir. Fakat soğurmadan sonra taşıyıcılar yüzey-ilişkili kusur durumlarına geçmekte ve burada rekombinasyonla ışık vermektedir. Saf kuantum sınırlama modeli ve genişletilmiş model arasında ayırım yapmanın bir yolu gözenekli silisyumun gerçek band aralığı ile yayılım ve lüminesans enerjisi arasında bir değişiklik aramaktır. Böyle değişiklikler için kanıt optik soğurma, fotoelektron spektroskopisi ve son zamanlarda gözenekli silisyumun redoks potansiyeli çalışmalarından elde edildi.

1.4.4 Gözenekli silisyumda lüminesans

Silisyumun band aralığından daha yüksek enerjilere sahip olan gözenekli silisyumdan lüminesansla ilgili ilk bilgi 1984 yılında Pickering ve arkadaşları tarafından verildi. 1990 yılında Takagi ve arkadaşları kuantum sınırlama olayının Si nanokristallerinde görünür lüminesans süreçlerinde önemli bir rol oynadığını gösterdiler. Silisyumun band aralığından yüksek enerjilerde verimli, ayarlanabilir, oda sıcaklığında ışık emisyonu gösteren gözenekli silisyumdan ışık yayılımına ilgi, gerçek anlamda 1990 yılında Canham'ın çalışması ile başladı. Şekil 1.17, hazırlama koşullarını değiştirerek, yayılım enerjisinin yakın kızıl ötesi bölgeden görünür spektrumun mavi-yeşil kısmına kadar değişebildiğini göstermektedir. Canham'ın çalışması ile hemen hemen aynı zamanda Lehmann ve Gosele (1991) gözenekli

silisyumun geçirgenlik spektrumunu yayınladı. Bu çalışmanın sonuçları da, gözenekli silisyumun band aralığının kristal silisyumunkinden fazla olduğunu gösterdi.



Şekil 1.17 Oda sıcaklığında değişik hazırlama koşulları ile üretilmiş gözenekli silisyum örneklerin fotoluminesans spektrumları (Collins vd., 1997)

Yeni hazırlanmış gözenekli silisyumun, kızıl ötesi (IR) geçirgenlik çalışmalarından ve X-ışını absorpsiyon ölçümlerinden yüksek yoğunlukta hidrojen içerdiği ve hidrojenin de, silisyum yüzeyindeki kırık bağları azalttığı görülmüştür. Gözenekli silisyumun son derece yüksek yüzey alanına rağmen, yeni hazırlanmış malzemedeki kırık bağların yoğunluğu elektron paramagnetik rezonansın meydana çıkma sınırının altında olabilir. Yeni hazırlanmış örnekte kırık bağlar elektron paramagnetik rezonans ile tespit edilemeyecek kadar azdır ve optik verimliliği çok yüksektir. Oda sıcaklığında, kuantum verimliliğinin %1-10 arasında olduğunu bildirdiler. Bununla birlikte, hidrojenle kaplı bir malzeme, oda sıcaklığında oksidasyona ve hidrojen kaybına oldukça meyillidir. Her ikisi de optik verimliliğin azalmasına neden olmaktadır.

Fotoluminesanstan başka gözenekli silisyumda elektrolüminesans olayı da son yıllarda incelenmiştir (Iyer vd., 1992; Fauchet vd., 1993; Collins vd., 1995). Optik uyarılma altında gözenekli silisyumun yüksek lüminesans verimliliği dikkate değerdir. Fakat eğer malzeme, ışık yayıcı olarak pratik uygulamalara sahip olacaksa taşıyıcıların elektriksel injeksiyonu

sırasında benzer sonuçlar elde etmek gerekli olacaktır. Gözenekli silisyumdan yüksek verimlilikte fotolüminesans elde edildikten sonra elektrolüminesansa ilgi başladı. Katihal kontaklar ile yapılan aygıtlardaki ilk sonuçlar çok cesaret verici değildi. Bununla birlikte, sıvı kontaklar gerçek aygıtlarda kullanılabilir verimliliğin varlığını gösterdi (Bressers vd., 1992; Green vd., 1995).

İlk katihal ışık veren aygıtlar ince bir metalik elektrodun, gözenekli tabaka üzerine buharlaştırılması ile elde edilen LED'lerdi ve karakteristikleri de idealden çok uzaktı. Işık yayılımı bir ölçüde yüksek gerilim uygulamasını gerektirirdi. Yayınım sık sık ileri ve geri kutuplamada eşit şiddette gözlemlendi ve kuantum verimliliği % 0.001'den azdı. Gözenekli silisyumdan verimli katihal LED yapmada zorluklar arttığından bu şartııcı değildi. Bir fotolüminesans deneyinde, bir fotonun soğurulması, birbirine çok yakın, büyük bir olasılıkla da kolayca birleşebilecekleri tek bir nanokristal içinde elektron boşluk çifti yaratır. Bir LED'de ışık yayılımı, elektron ve boşlukların diyodun zıt kenarlarından tekrar birleşecekleri arınma bölgesine ulaşımını içerir. Bu taşıyıcıların, gözenekli şebeke içinden dolambaçlı bir yol izleyecekleri anlamına gelir. Bu ulaşım mekanizması tam olarak anlaşılmamıştır.

Daha sonra yapılan bir çalışmada, % 0.1 veya çok daha az iyi kuantum verimlilikleri katihal aygıtlarda elde edildi (Linnros ve Lalic, 1995; Loni vd., 1995; Tsybeskov vd., 1996). Bu yapılarda, silisyum katman ile p-n eklemi ve daha sonra elektrokimyasal anodizasyon ile eklemeye arınma bölgesine yerleştirilen ışık-veren gözenekli tabaka oluşturulmaktadır. Aygıt karakteristikleri dikkate değer gelişme göstermesine rağmen hala ideal değildir. Örneğin, elektrolüminesans 2V gibi düşük gerilimlerde ve sadece ileri kutuplama ile gözlemlendi. Maksimum verimlilik yaklaşık 5V'luk çalışma gerilimlerinde elde edildi.

LED'lerle ilgili son gelişmeler gerçekten destekleyici olmasına rağmen gözenekli silisyumun silisyum-uyumlu optoelektronik teknoloji için temel olabileceği sonucuna varmadan önce bazı problemlerin çözülmesi gereklidir. Uzun optik ömrü aygıt hızlarını sınırlayabilir ve yayılım spektrumu fiberoptik uygulamalarında dispersiyon olayını önlemek için önemli ölçüde daraltılmalıdır. LED'den daha fazla kesin tanımlanmış malzemeler gerektiren injeksiyon lazerin gözenekli silisyumdan yapılmış olup olmayacağı belli değildir. Belki de gözenekli silisyumdaki en önemli sınırlama, varolan silisyum işlemleri ile gözenekli

silisyumun uyumu olacaktır. Bu konuda elektrolüminesansın kararlılığı ana tema olmaya devam etmektedir. Hidrojen-yüzeyli gözenekli silisyumdan hazırlanan LED'ler, hidrojen-yüzeyli malzemelerdeki fotolüminesansa benzer bozulmalar gösterir. Gözenekli yüzey üzerinde ince bir oksit tabakası yaratmak için tavlama yapıldığı zaman kararlılık daha iyi olur, fakat SiO₂ bir yalıtkan olduğundan oksit tabakasının kalınlığı önemlidir.

Gözenekli silisyumdan oda sıcaklığında verimli ve görünür fotolüminesansın bulunmasından bu yana lüminesans mekanizmasını anlamada ilerlemeler görüldü. Bunlara ek olarak, fotolüminesans verimlilikle uyumlu elektrolüminesansı anlamadaki son gelişmeler de umut vericidir (Collins vd., 1997).

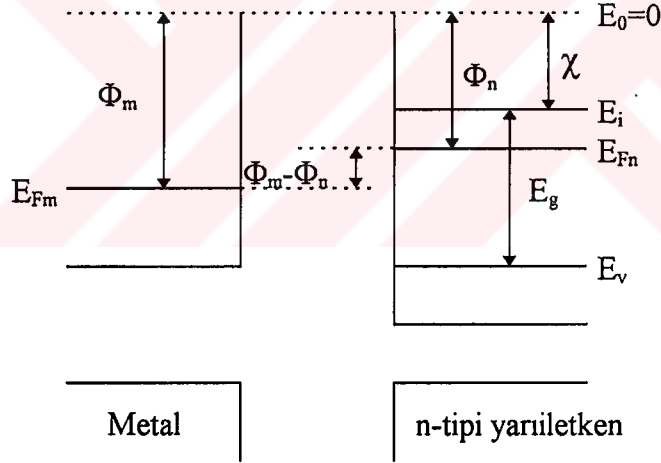


1.5 Schottky Engelleri ve Heteroeklemler

1.5.1 Metal-yarıiletken engelleri

Birbirlerine yaklaştırılmış bir metal yüzeyi ile bir yarıiletken yüzeyini inceleyelim. Arada vakum bulunduğunu, yarıiletkenin n-tipinde ve donör konsantrasyonunun yeter derecede büyük olduğunu, bunların hemen hemen hepsinin oda sıcaklığında iyonize olmuş olduğunu kabul edelim.

Önce metalin çıkış işinin n-tipi yarıiletkeninkinden büyük olduğu durumu ele alalım. Metalin ve yarıiletkenin enerji şemaları Şekil 1.18’de vakum seviyeleri ($E_0=0$) aynı düzeye gelecek şekilde çizilmiştir. Φ_m metalin çıkış işini, Φ_n n-tipi yarıiletkenin çıkış işini göstermektedir. Yarıiletkenin elektron alınganlığı (χ), iletkenlik bandının dibinden vakum seviyesine elektron taşımak için gerekli olan enerjidir.

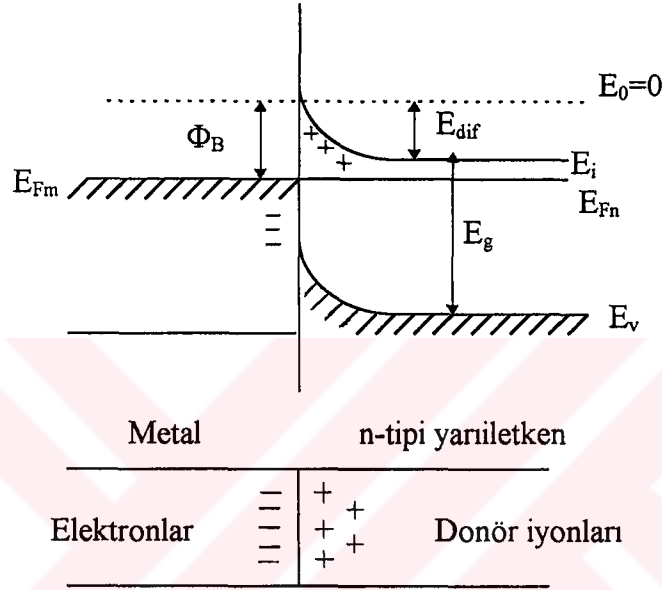


Şekil 1.18 Metal-n-tipi yarıiletkenin kontakta önceki enerji diyagramı ($\Phi_m > \Phi_n$)
(Akpınar, 1979)

Metal ile yarıiletken temas edecek kadar birbirlerine yaklaştırıldığında, metal ile yarıiletken arasında elektron alışverişinin sağlandığını düşünelim. Yarıiletkenin E_F Fermi enerjisi metalinkinden daha yüksek olduğu için elektron dengesi yarıiletkenden metale doğru akan elektronlarla sağlanacaktır. Bu, metali daha negatif, yarıiletkeni ise daha pozitif yapacak ve

Coulomb kuvvetleri dolayısıyla da bu yükler her iki ortamın temas bölgesinde yoğunlaşacaktır. Denge oluşunca $E_{Fm}=E_{Fn}$ eşitliği kurulacaktır.

Temas bölgesinde metal ile yarıiletkenin enerji seviyeleri diyagramı Şekil 1.19'daki durumu alır. Yarıiletkenin iletkenlik ve valans band kenarları yukarı doğru bükülür. Metalin temas yüzeyinde ise böyle bir bükülme yoktur.



Şekil 1.19 Elektriksel kontakt halinde metal-yarıiletken için enerji diyagramı ($\Phi_m > \Phi_n$) (Akpınar, 1979)

Yarıiletkende iyonize olmuş donör atomlarının uzay yükleri, dolayısıyla elektronların ($-eV$) potansiyel enerji dağılımı da böyle bir bükülmeye neden olacaktır. Diğer taraftan kristalin yapısı değişmemiş olduğu için elektronların bağlanma enerjileri de değişmemiştir. Bu ise, yarıiletkenin iletkenlik bandının dibinin ve valans bandının aynı bükülmeyi yapmasına yol açar.

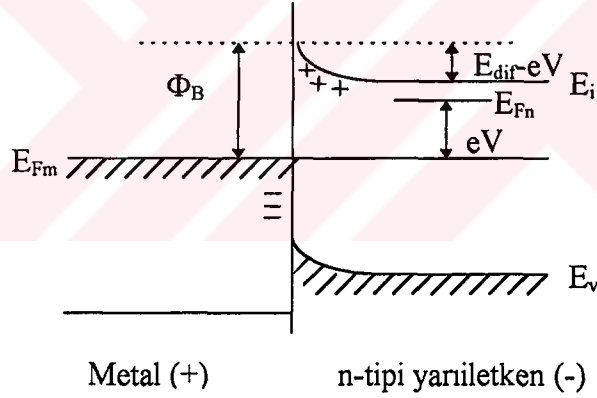
Yarıiletken içinde bulunan $\Phi_m - \Phi_n$ farkına difüzyon potansiyel enerjisi (E_{dif}) adı verilir. Elektron yükü (e)'ye bölmekle difüzyon potansiyeli elde edilir.

$$V_{dif} = \frac{\Phi_m - \Phi_n}{e} \quad (1.10)$$

Temas yerinde oluşan V_{dif} potansiyeli bir taraftan diğer tarafa geçecek yük taşıyıcıları (elektronlar) için bir engel mahiyetindedir (Akpınar, 1977, 1979).

Mutlak sifıra eşit olmayan bir sıcaklıkta yeter yükseklikte enerjileri olan bazı elektronlar sağdan sola geçebilecekleri gibi bazıları da soldan sağa geçebileceklerdir. Fakat termik denge durumunda bu iki taraflı J_0 akım yoğunlukları birbirine eşit olacaktır.

Şimdi yarıiletkeni metale nazaran $(-V)$ kadar negatif yaptığımızı düşünelim (Şekil 1.20). Bu takdirde yarıiletkendeki bütün elektronların enerjileri $(-e)(-V)=eV$ kadar yükselmiştir. Dolayısıyla yarıiletkenin Fermi enerjisi de (eV) kadar yükseltilmiş olur. Şekil 1.20 bu durumdaki enerji seviyelerini göstermektedir. Metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmemiştir. Bu doğrultuda elektron akım yoğunluğu J_0 değerini korur. Fakat yarıiletkenden metale geçmek isteyen elektronlar için aşılması lazım gelen engel yüksekliği (eV) kadar alçalmış bulunmaktadır.



Şekil 1.20 V gerilimi altında metal-n-tipi yarıiletken kontaktı (Akpınar, 1979)

Potansiyel uygulanmadan önce, metalden yarıiletkene geçen elektronlar için J_0 akım yoğunluğu

$$J_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \quad (1.11)$$

dır. A , Richardson sabitidir.

Yarıiletkeni terk ederek soldaki metale geçmek isteyen bir iletkenlik bandı elektronu $E_{dif} = \Phi_m - \Phi_n$ veya daha büyük bir enerjiye sahip olmalıdır.

Yine sağdan sola geçen elektron akım yoğunluğu, uygulanan (-V) potansiyeli altında ise

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B - eV}{kT}\right) \quad (1.12)$$

büyükliğini alır. İki akım yoğunluğu artık birbirine eşit değildir. Aradaki farka J_d dersek

$$J_d = J - J_0 = J_0 \exp\left[\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (1.13)$$

elde edilir. J_0 , doyma akım yoğunluğudur. J_d , geçirme yönünde polarize edilmiş bir diyottan geçen akım yoğunluğunun ifadesidir.

(1.13) denklemi ideal (kusursuz) metal-yarıiletken engeller için verilmektedir. Gerçek (kusurlu) engeller için bu denkleme ideallik faktörü (n) ilave edilir. Akım yoğunluğu (J),

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1.14)$$

olarak ifade edilebilir.

Yüksek gerilimler için ($eV \gg nkT$),

$$J = J_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (1.15)$$

olur. Buradan n ideallik faktörü,

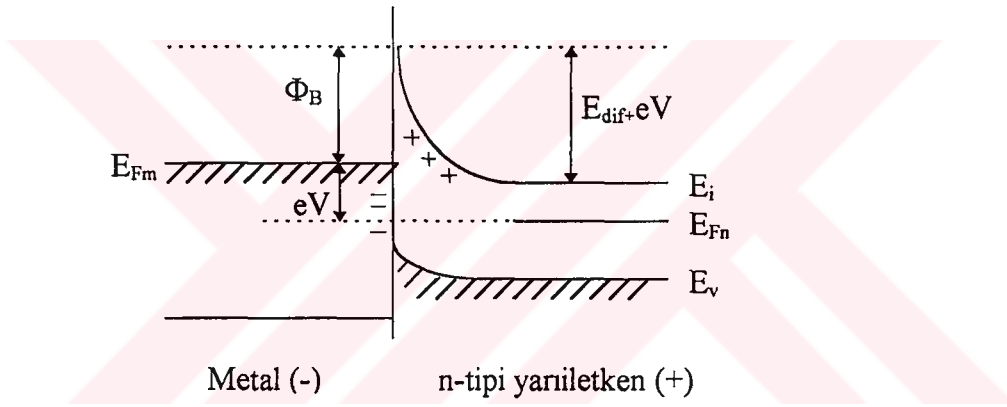
$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln J)} \quad (1.16)$$

olarak belirlenir (Sze, 1981).

Sisteme uygulanan gerilim yönü Şekil 1.20'dekinin tersine ise,

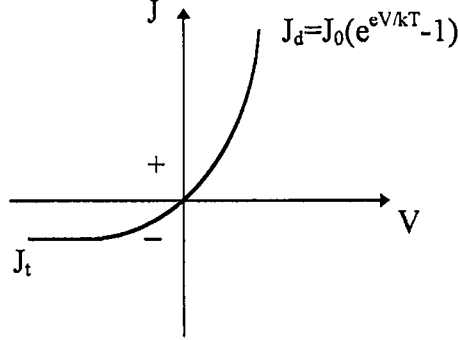
$$J_t = J_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-eV}{kT}\right) \right] \quad (1.17)$$

bulunur (Şekil 1.21). J_t , ters yönde polarizlenen diyodun akım yoğunluğudur.



Şekil 1.21 V gerilimi altında metal-n-tipi yarıiletken kontakt (Akpınar, 1979)

(1.13) ve (1.17)'den, buradaki şartlar altında incelenen metal-n-tipi yarıiletken diyodu (doğrultucusu) için Şekil 1.22'deki gibi bir akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği elde edilir.



Şekil 1.22 Bir metal-n-tipi yarıiletkenin akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği (Akpınar, 1979)

Birbirleriyle temas eden metal ve n-tipi yarıiletkende eğer yarıiletkenin çıkış işi metalinkinden büyük olursa ($\Phi_n > \Phi_m$), elektron dengesi metalden yarıiletkene geçecek elektronlarla sağlanacaktır. Temas sonucunda oluşan termik denge dolayısıyla her iki cismin Fermi enerjileri aynı seviyeye gelecektir. Termik denge kurulurken metalden yarıiletkene geçen elektronlar yarıiletkenin yüzeyini negatif yüklerler. Metalin temas yüzeyi ise aynı miktarda pozitif yüklü kalır. Yine bir çift tabaka meydana gelmiştir. Yalnız bu sefer yarıiletkene ait seviyeler fazla bir bükülme göstermeyecektir. Çünkü yarıiletkenin iletkenlik bandında bol miktarda boş elektron seviyesi mevcuttur.

Yarıiletkeni negatif, metali pozitif yapmak üzere, sistemi bir (V) potansiyel kaynağına bağlarsak yarıiletkenin band kenarları yine $(-e)(-V)=eV$ kadar yükselecektir. Yalnız bu sefer aradaki potansiyel engeli küçük olduğundan yarıiletkenden metale elektron geçişi zor olmayacaktır. Potansiyel düşmesi de kontakt bölgesinde değil, iletkenliğin metale nazaran zayıf olması nedeniyle yarıiletken boyunca olacaktır.

Akım kaynağı ters yönde, yani yarıiletken pozitif olacak şekilde bağlanırsa yine elektron akımı, metalden yarıiletkene doğru fazla bir engelle karşılaşmayacaktır. Yani elektron akımı, yukarıda olduğu gibi bu sefer de hemen hemen engelsiz şekilde akacaktır. Bu çeşit kontakt, her iki doğrultuda da simetrik olduğu için omik bir kontaktır.

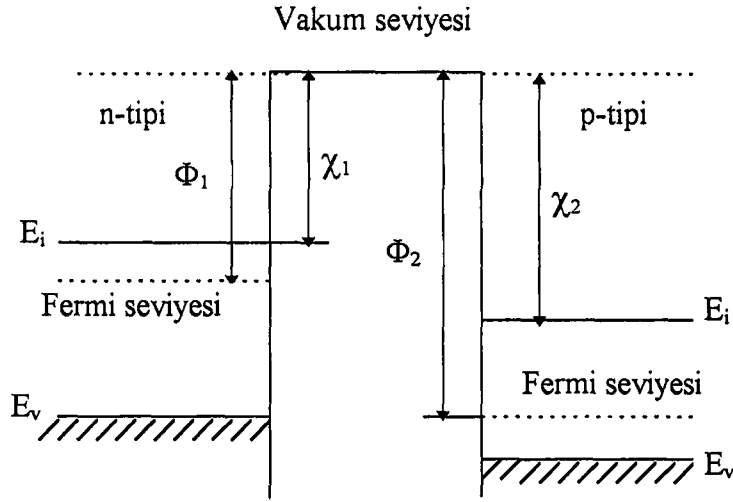
1.5.2 Heteroeklemler

Bir eklemin iki tarafındaki p ve n tipi yarıiletken birbirinden farklı cinsten ise bu çeşit eklemlere heteroeklem denir. Heteroeklem yapılabilmesi için kullanılacak yarıiletkenlerin kristal yapısı, örgü parametresi ve termik genişleme katsayıları arasında uyuma olmalıdır (Akpınar, 1977). Farklı yarıiletken malzemeler arasındaki kontaklar, iki malzemenin beraber sıkıştırılması ile değil, n-tipi veya p-tipi malzeme üzerinde başka bir p-tipi veya n-tipi malzemenin yaklaşık olarak aynı örgü sabiti ile büyütülmesi ile yapılır. Dört farklı durum vardır: n-n eklemleri, n-p eklemleri, p-n eklemleri ve p-p eklemleri. Genellikle elmas yapısında olan yarıiletkenler en çok kullanılanlardır. Bu sınırlılığın nedeni eklem bölgesinde mümkün olduğu kadar sürekli bir kristal düzeni olması mecburiyetidir. Bu süreklilik sıcaklık değiştiğinde de bozulmalıdır. İki tarafın örgü parametreleri arasında %1'e varmayan bir farklılık heteroeklem yapılabilmesi için yeterli sayılmaktadır (Akpınar, 1977). Heterojen yapılarda kullanılan yarıiletken çiftleri arasında Ge/GaAs, AlAs/GaAs, InAs/GaSb, GaP/Si ve ZnSe/GaAs sayılabilir (Kittel, 1996).

Eklem düzleminde iki tarafın örgü parametrelerinin tam bir uyum göstermesine dikkat edilmelidir. Eğer örgü sabitleri %1'den farklı veya termik genişleme katsayıları pek farklı ise o zaman ara düzlem civarında örgü yapılarında büyük gerilmeler olur, bu gerilme ve bozukluklar ara düzlem üzerinde elektron ve boşluk toplanmaları meydana getirir.

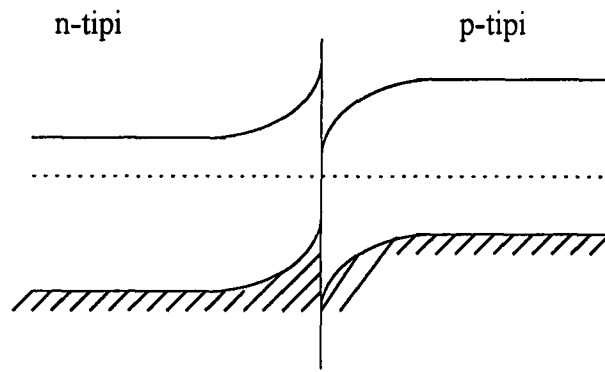
Eğer heteroeklem hazırlanırken gereğinden yüksek sıcaklıklara çıkarılırsa kendiliğinden katkılama (auto-doping) oluşabilir. Bununla beraber, sıcaklık yeteri kadar yüksek tutulmamış ise bu sefer eklem yüzeyinin tek kristal düzeni olabilmesi de güçleşir. Eklem yüzeyinin yabancı katılardan uzak tutulması, aşırı derecede temizliğe dikkat edilmesi de çok önemlidir (Akpınar, 1977).

Şekil 1.23, kontak yapılmadan önce iş fonksiyonları Φ_1 ve Φ_2 olan n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin band şemalarını göstermektedir. $\Phi_2 > \Phi_1$ olduğu kabul edildi. χ_1 , n-tipi yarıiletkenin ve χ_2 p-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandının dibinden elektron koparmak için gerekli olan enerjidir.



Şekil 1.23 Temas haline getirilmeden önce n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin band şemaları

Eğer Şekil 1.24’de görüldüğü gibi iki yarıiletken birbirleriyle temas haline getirilirse Fermi enerjileri aynı seviyeye gelene kadar n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene elektron akışı olacaktır. Elektronların bu yer değiştirmesi iki tarafın band seviyelerini bükecektir. Böylece n tarafında iyonize donörler, p tarafında iyonize akseptörler oluşacaktır. Band aralıklarının farklı olmasından dolayı iletkenlik bandının dibini veya valans bandının tavanını çakışmayacaktır. Buna rağmen, bu yine de doğrultucu bir kontakttır (Akpınar, 1977).



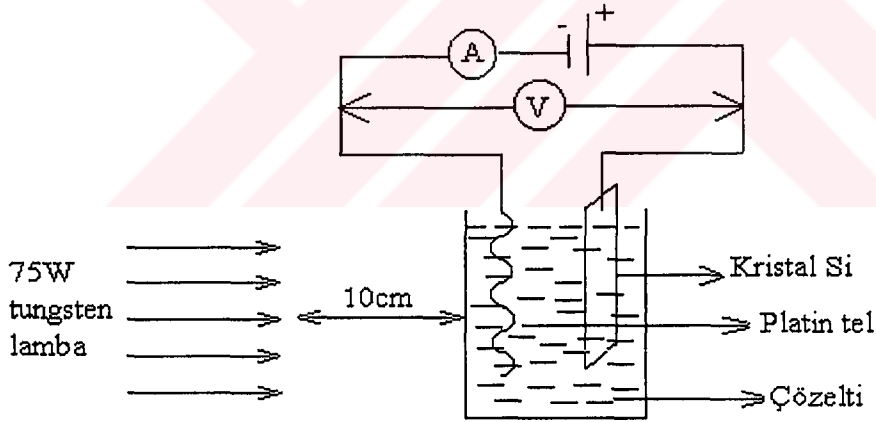
Şekil 1.24 Kontakta sonra n-p tipi yarıiletkenin oluşturduğu heteroeklemin band şeması

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Gözenekli Silisyumun Yapılması

Gözenekli silisyum örnekleri, tek kristalli silisyumun hidroflorik asit (HF) içerisinde sabit akım yoğunluğunda elektrokimyasal anodizasyon yoluyla aşındırılması sonucunda elde edildi. Anodizasyon işlemi sırasında elektrot olarak platin tel kullanıldı.

Bu çalışmada, öz direnci $0.006-0.015 \Omega\text{cm}$, kalınlığı yaklaşık $380\mu\text{m}$ olan ve (111) yönelime sahip Sb katkılı n-tipi silisyum kristalleri ve öz direnci $10 \Omega\text{cm}$ ve (111) yönelime sahip B katkılı p-tipi silisyum kristalleri kullanılmıştır. Gözenekli silisyum elde ederken, n-tipi Si kullanıldığında $1\text{HF}(\%38-40):3\text{H}_2\text{O}$ (distile su) ve p-tipi Si kullanıldığında ise $1\text{HF}(\%38-40):1\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} (\%99.5)$ oranında hazırlanan çözeltilerden yararlanılmıştır. Her iki tip Si kristali ile gözenekli silisyum oluşturulurken, örnekler 75W tungsten lamba ile aydınlatılmıştır. Gözenekli silisyumun oluşturulduğu deney düzeneği Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1 Gözenekli silisyumun elde edilmesinde kullanılan deney düzeneği

Gözenekli silisyum oluşturmada n-tipi Si kristali kullanıldığında, Si kristali $1\text{HF}:3\text{H}_2\text{O}$ çözeltisine daldırılmadan önce yüzeyi alkolle temizlendi.

p-tipi Si kristali ile gözenekli silisyum elde etmek için ise, anodizasyon işleminden önce düzgün akım dağılımını sağlamak amacıyla silisyum örneğinin arka yüzeyine Ag omik

kontakt yapıldı ve parlak yüzeyi alkolle temizlendikten sonra 1HF:1C₂H₅OH çözeltisine daldırıldı.

Anodizasyon işlemi sırasında, silisyum kristali doğru gerilim kaynağının pozitif ucuna, elektrot platin tel ise negatif ucuna bağlanmıştır.

Farklı akım yoğunlukları , farklı anodizasyon zamanı ve değişik oranlarda hazırlanan çözelti ile homojen gözenekli silisyum elde edilmeye çalışıldı. Yapılan denemelerle en iyi sonucun, 12-15mA/cm² sabit akım yoğunluğunda , 20 dakikada ve 75W tungsten lamba kullanılarak elde edildiği gözlemlendi. Karanlıkta ve oda ışığında yapılan gözenekli silisyum oluşturma denemelerinden bir sonuç alınamamıştır. Her iki tip Si kristalinde de ışık kaynağı kullanılarak gözenekli silisyum yapılmıştır. Işık kaynağı deney düzeneğinden yaklaşık 10cm uzağa yerleştirilmiştir.

Anodizasyon işleminden sonra, çözeltiden çıkarılan örnekler alkolle temizlendi. Elde edilen bu gözenekli silisyum yüzeyinin grimsi renkte olduğu gözlemlendi. Örnekler üzerine UV ışık düşürüldüğünde, film tabakası yüzeyinin ilk anda homojen yeşil lüminesans, çok kısa bir süre sonra ise homojen turuncu lüminesans verdiği ve bu turuncu lüminesans rengin sabit kaldığı gözlemlendi.

2.2 Gözenekli Silisyum İnce Filmlerin Elde Edilmesi

Sabit akım yoğunluğunda, belli anodizasyon süresinde ve ışık kaynağı kullanılarak gözenekli silisyum oluşturulduktan sonra, örnek çözelti içerisinde çıkarılmadan akım yoğunluğu 1-2 dakika yaklaşık 900-1000mA/cm² 'lere kadar hızlı bir şekilde artırılır. Bu sırada, silisyum yüzeyinden ince bir gözenekli silisyum film tabakası ayrıldı. Ayrılan film tabakaları kalınlıklarının 10-30 µm arasında olduğu belirlendi.

Gözenekli silisyumun optik özelliklerinin incelenmesi için, ince gözenekli silisyum film tabakalarının elde edilmesi gereklidir.

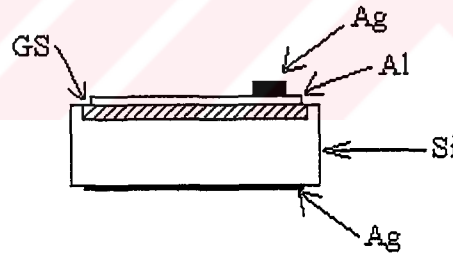
Gözenekli silisyumun gözenekliliği,

$$P(\text{Gözeneklilik}) = \frac{\rho_{\text{Si}} - \rho_{\text{GST}}}{\rho_{\text{Si}}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

bağıntısından hesaplanır. ρ_{Si} hacimli silisyumun yoğunluğu ve ρ_{GST} gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılan gözenekli silisyum film tabakasının yoğunluğudur (Lehmann ve Gosele, 1991). $\rho_{\text{Si}} = 2.33 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. ρ_{GST} yoğunluğu, $\rho_{\text{GST}} = \frac{m_{\text{GST}}}{V_{\text{GST}}}$ bağıntısından bulunmuştur. m_{GST} gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılan film tabakasının ağırlığı ve V_{GST} gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılan film tabakasının hacmidir. Bu çalışmada, gözeneklilik %70-80 olarak hesaplanmıştır.

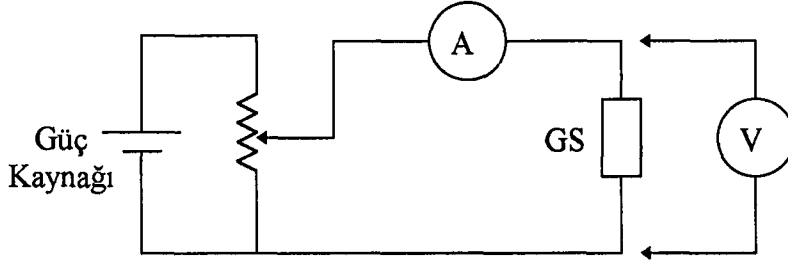
2.3 Elektriksel Ölçümler

Elektriksel ölçümlerin yapılması için elde edilen gözenekli silisyum örnekte, gözenekli silisyum yüzeyine vakumda elektron beam yöntemiyle Al film kaplanmıştır. Şekil 2.2'de gözenekli silisyum örneğinin yüzeylerine yapılan kontaklar görülmektedir.



Şekil 2.2 Gözenekli silisyumun yüzey kontakları

Karanlıkta ve aydınlıkta (50W tungsten lamba) gözenekli silisyum örneğinin gözenekli yüzeyi üzerindeki alüminyum (Al) kontakt ile arka yüzeyindeki kontakt arasında akım-gerilim karakteristikleri oda sıcaklığında çıkarılmıştır. Şekil 2.3, akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şemasını göstermektedir.



Şekil 2.3 I-V karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şeması

Çizilen I-V eğrilerinden, Al-Gözenekli Silisyum-Si yapının $T=300\text{ K}$ 'de karanlık ve aydınlıktaki akım-gerilim karakteristiği, doyma akımının sıcaklıkla değişimi, n ideallik faktörü ve Φ_B engel yüksekliği belirlenmiştir.

Eklemin akım-gerilim karakteristiğinin ters yöndeki kolundan yararlanarak ve (1.11) eşitliğini kullanarak Φ_B engel yüksekliği,

$$\Phi_B = 0.2 \text{tg} \alpha \text{ (eV)} \quad (2.2)$$

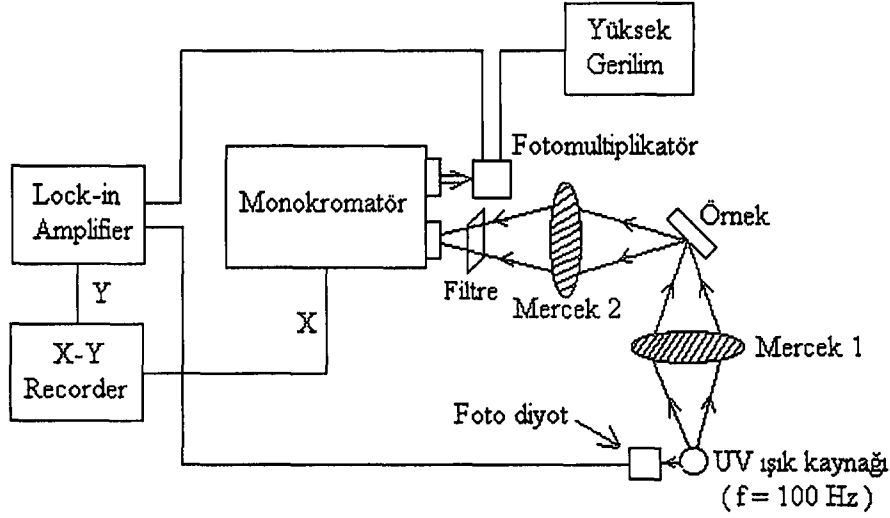
olarak elde edilir. $\text{tg} \alpha$, $\log I$ ile $10^3/T$ arasında çizilen eğrinin eğimidir.

Eklemin doğru yöndeki akım-gerilim karakteristiğinden yararlanarak ve (1.16) eşitliğini kullanarak n ideallik faktörü,

$$n = \frac{1}{0.026 \cdot \text{tg} \beta} \quad (2.3)$$

olarak belirlenir. $\text{tg} \beta$, $\ln I$ ile V arasında çizilen eğrinin eğimidir. Oda sıcaklığında $kT=0.026\text{eV}$ tur.

2.4 Fotolüminesans Spektrumlarının İncelenmesi



Şekil 2.4 Fotolüminesans ölçümleri için kullanılan devrenin şeması

Gözenekli silisyum örneklerin fotolüminesans spektrumlarının dalga boyuna bağlı değişimlerini incelemek için, bu örnekler 370 nm dalga boylu ışık yayınlayan UV lamba ile uyarılmıştır. Bunun için odak uzaklığı 10 cm olan kuvars bir mercekten yararlanılmıştır (Şekil 2.4). Örnek yüzeyinde gözlenen lüminesansın monokromatör girişine tam olarak odaklanması için odak uzaklığı 10 cm olan diğer bir cam mercekle kullanılmıştır. Ayrıca, monokromatör girişine UV lambadan yayılan ışığın girmesini önlemek için mercekten sonra yer alan bir filtreden yararlanılmıştır. Deney düzeneğinde Bentham MP-10188B tek grating'li monokromatör kullanılmıştır. Monokromatörden çıkan ışığın şiddeti azaldığından 1PA18 fotomultiplikatör kullanılarak şiddet yükseltilmiştir. Fotomultiplikatör 1000V'luk DC gerilimle beslenmiştir. Fotomultiplikatörden kuvvetlendirilmiş olarak çıkan sinyal Hewlett Packard marka EG&G 5204 "Lock-in Amplifier"a gönderilmiştir. Lüminesans sinyallerinin yükseltilebilmesi için "Lock-in Amplifier"a ışık kaynağı ile aynı fazda bir referans sinyalinin uygulanması gerekmektedir. Bu referans sinyali bir silisyum foto diyottan elde edilmiştir. Elde edilen lüminesans şiddetlerinin dalga boyuna bağlı değişimleri Philips marka PM8272 "X-Y Recorder"de kayıt edilmiştir. Bu şekilde oda sıcaklığındaki fotolüminesans spektrumları belirlenmiştir.

Fotolüminesans şiddetinin gözenekli silisyum kalınlığı ile değişim ölçümleri için, elde edilmiş filmlerden (kalınlığı yaklaşık 10-30 μ m) seri olarak ince filmler (yaklaşık 2-3 μ m) çıkartılarak fotolüminesans şiddeti ve filmlerin direnci hesaplanmıştır.

2.5 Optik Spektrumlarının İncelenmesi

Optik ölçümlerin yapılabilmesi için akım yoğunluğu artırılarak gözenekli silisyum yüzeyinden film tabakasının ayrılması gereklidir. Ayrılan bu filmlerin, kısa dalga boylarındaki optik spektrumları $\lambda=0.5-1.1\mu\text{m}$ aralığında Perkin Elmer Lambda 2S spektrometresi, uzun dalga boylarındaki optik spektrumları ise $\nu=400-4000\text{cm}^{-1}$ ($\lambda=2.5-25\mu\text{m}$) aralığında MATTSON 1000 Fourier Transform Infrared (FTIR) spektrometresi kullanılarak elde edilmiştir.

Kısa dalga boylarındaki $T=f(\lambda)$ geçirgenlik-dalga boyu eğrilerinden yararlanarak tek kristalli Si'un ve gözenekli silisyumun band aralığı ve uzun dalga boylarındaki $T=f(\nu)$ eğrilerini kullanarak ise filmlerin R yansımaya katsayıları, α soğurma katsayıları ve filmlerdeki moleküllerin titreşim frekansları ve kompozisyonları belirlenmiştir.

2.5.1 Filmlerin yansımaya ve soğurma katsayılarının analizi

Filmlerin optik karakteristiklerinin incelenmesi için, gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılan ince filmlerin FTIR'da elde edilmiş $T=f(\nu)$ eğrileri kullanılmıştır (Şekil 2.5). Bu eğrilerdeki interferens franjlarından yararlanarak filmlerin n kırılma indisleri ve R yansımaya katsayıları hesaplanmıştır.

Ard arda gelen iki maksimum veya iki minimum değere karşılık gelen dalga sayılarını kullanarak,

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (2.4)$$

bağıntısından kırılma indisi hesaplanır. Burada; n kırılma indisi, d ince filmin kalınlığı, λ_1 ve λ_2 ise birbirini izleyen maksimum veya minimum değerdeki dalga boylarıdır (Pickering vd., 1984).

R yansımaya katsayısı ise

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2.5)$$

bağıntısından hesaplanır (Pankove, 1971).

Şekil 2.5'den yararlanarak yapılan hesaplamalar sonucunda $n=0.695$ ve $R=0.03$ olarak bulunmuştur. Bulduğumuz bu sonuç, Schirone ve arkadaşları (1996) tarafından elde edilen sonuçla aynıdır.

Işığın geçirgenliği,

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)} \quad (2.6)$$

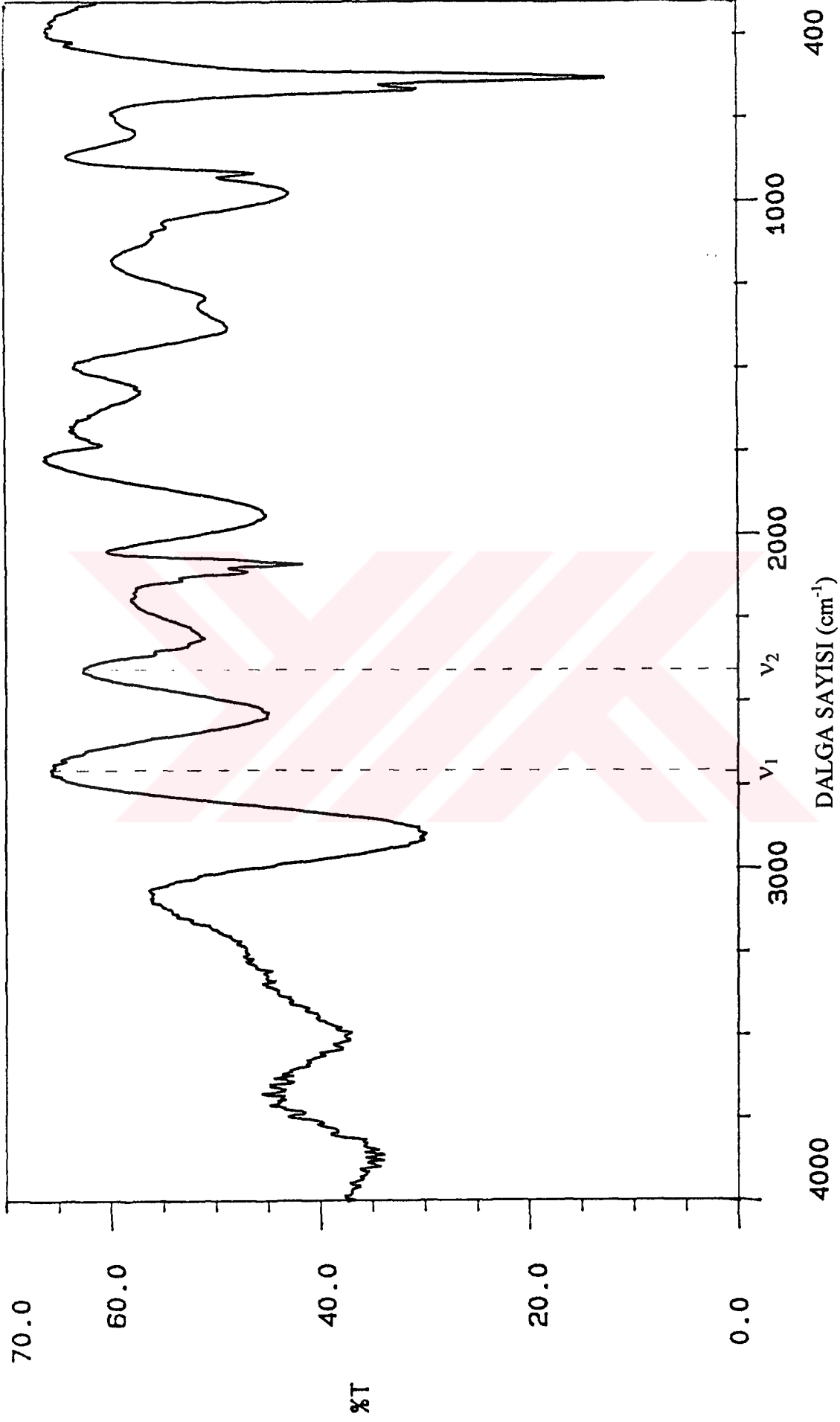
ile verilir. Burada, T geçirgenlik, R yansımaya katsayısı, α soğurma katsayısı ve d ince filmin kalınlığını göstermektedir. $\alpha d \gg 1$ ise paydadaki $R^2 \exp(-2\alpha d)$ terimi ihmal edilebilir. O zaman

$$T = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.7)$$

olur. Buradan α soğurma katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{T} \quad (2.8)$$

olarak belirlenir (Pankove, 1971). $T=f(v)$ eğrileri ve yukarıda belirlenen $R=0.03$ değeri kullanılarak filmlerin α soğurma katsayıları (2.8) bağıntısı ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.5 Filmlerin yansıma ve soğurma katsayılarının belirlenmesi için $T = f(\nu)$ eğrisi

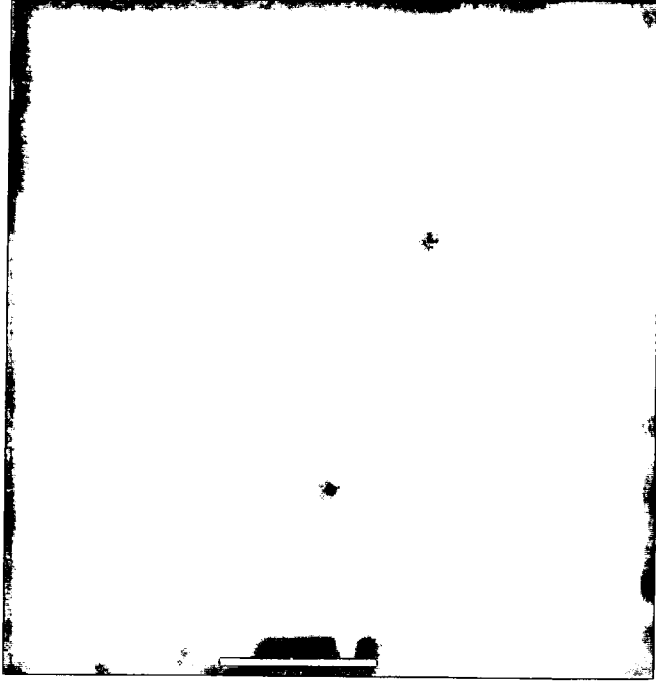
2.5.2 Filmlerin soğurma katsayılarının tavlamaya bağlı değişim ölçümleri

Tavlamanın fotolüminesans veren filmlerin soğurma katsayıları üzerindeki etkilerini incelemek için filmlere farklı sıcaklıklarda tavlama verilmiştir. İlk olarak, filmlere tavlama verilmeden önce $T=f(\nu)$ eğrileri elde edilmiştir. Sonra filmlere, kademeli olarak zamana bağlı olarak $T=80^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{top}}=240\text{dak.}$), $T=140^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{top}}=210\text{dak.}$) ve $T=190^{\circ}\text{C}$ ($t_{\text{top}}=60\text{dak.}$) sıcaklıklarında atmosfer ortamında tavlama verilmiştir. Her sabit sıcaklıkta, her tavlama zamanından sonra filmlerin optik spektrumlarının ve fotolüminesans şiddetlerinin değişimleri ölçülmüştür. Filmlerin fotolüminesans vermeleri kaybolana kadar tavlama vermeye devam edilmiştir. Elde edilen optik spektrum eğrilerinden faydalanarak Si-O-Si ve Si-H₂ moleküllerinin titreşim piklerinin soğurma katsayılarının zamanla nasıl değiştikleri incelenmiştir.

2.6 Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Turuncu fotolüminesans veren ve $T=200^{\circ}\text{C}$ 'de $t=100$ dakika tavlama verilerek fotolüminesans özelliğini kaybeden gözenekli silisyum örneklerin JEOL marka JSM 5410 Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) resimleri çekilmiştir. Büyütme 20.000 dir. Tavlamadan önce ve tavlamadan sonraki elektron mikroskobu resimleri Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmiştir. Bu iki resim karşılaştırıldığında fotolüminesans veren örnekte mikrokristallerin boyutunun küçük olduğu, fotolüminesans vermeyen örnekte ise mikrokristallerin boyutlarının daha büyük, fakat sayıca az olduğu görülmektedir.

Şekil 2.6'da tavlamadan önce fotolüminesans veren örneğin gözenekliliğinin fazla olduğu, Şekil 2.7'de ise tavlama verdikçe silisyum yüzeyine doğru girildiğinden mikrokristallerin boyutunun büyüdüğü ve gözenekliliğin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 2.6 Tavlamadan önce fotolüminesans veren örneğin SEM resmi
(çizgi=1 μm)

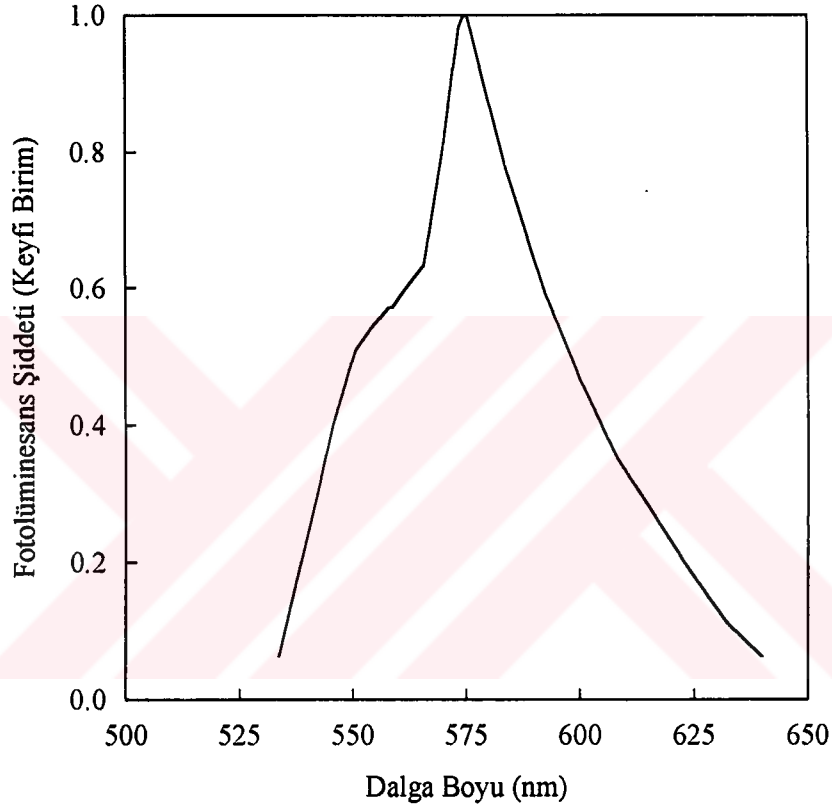


Şekil 2.7 Tavlamadan sonra fotolüminesans vermeyen örneğin SEM resmi
(çizgi=1 μm)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

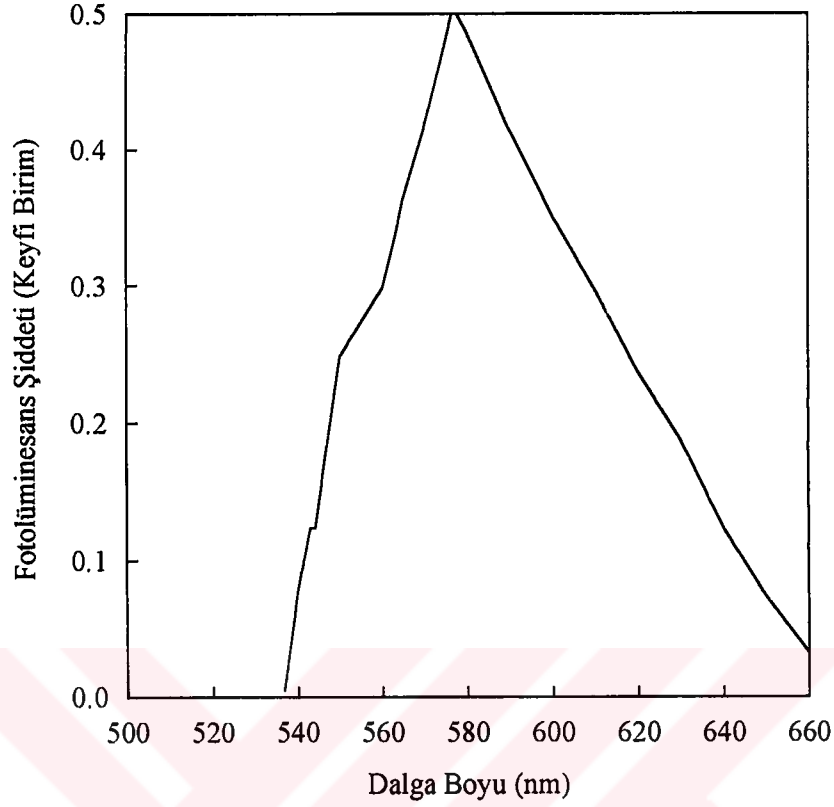
3.1 Gözenekli Silisyumun Fotolüminesans Spektrumları

Elde edilmiş gözenekli silisyum örneklerin tavlamadan önce ve tavlamadan sonraki ($T=200^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{dak.}$) fotolüminesans spektrumları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Gözenekli silisyum örneğinin tavlamadan önceki fotolüminesans spektrumu

Bu ölçümlerden tavlamadan sonra turuncu fotolüminesans şiddetinin azaldığı ve fotolüminesans şiddetinin dalga boyu band aralığının daha geniş olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.2 Gözenekli silisyum örneğin tavlamadan sonraki fotolüminesans spektrumu

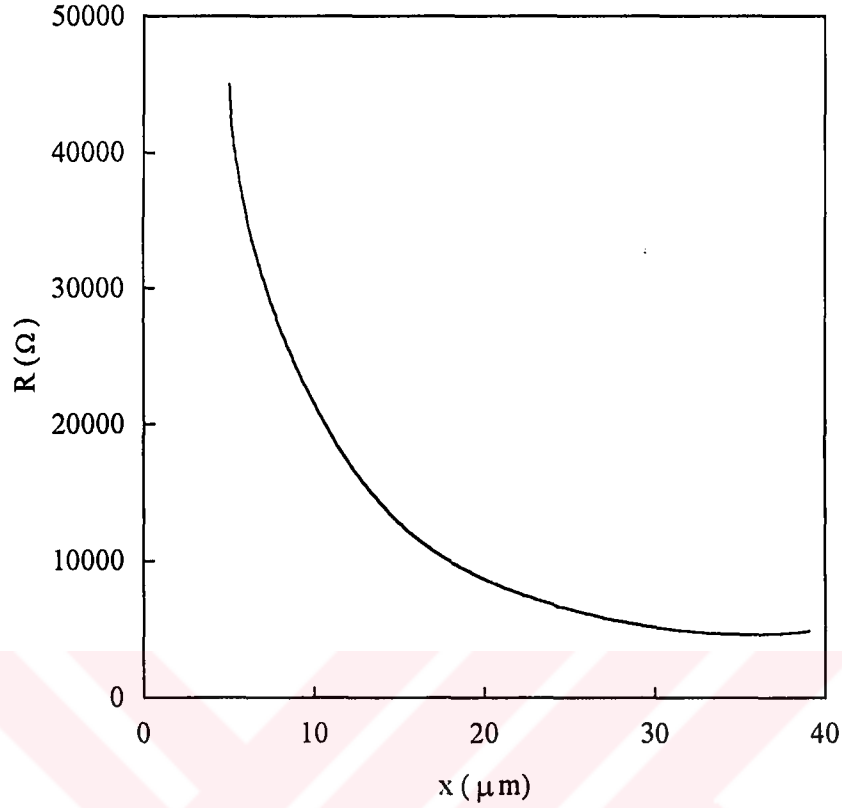
Gözenekli silisyum filminin tüm kısmının kalınlığı fotolüminesans vermemektedir. Gözenekli silisyum yüzeyinden ince filmler çıkarılarak fotolüminesans şiddetleri ölçülmüştür. Bu sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Bu ölçümlerden filmin fotolüminesans veren bölgesinin, gözenekli silisyum filminin yaklaşık %40 kalınlığında yer aldığı görülmektedir. Bu ise gözenekli silisyum yapısının homojen olmadığını göstermektedir.

Çizelge 3.1 Gözenekli silisyum film kalınlığı ile filmin fotolüminesans veren kısmının kalınlığı arasındaki ilişki

Örnek No	Gözenekli Silisyum Film Kalınlığı (μm)	Filmin Fotolüminesans Veren Kısmının Kalınlığı (μm)
1	4	2
2	6	2
3	10	3
4	12	4
5	15	5
6	20	9
7	34	18

Gözenekli silisyum filmin direncinin, kalınlıkla değişimi Şekil 3.3'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, gözenekli silisyum yüzeyinden mekanik olarak çıkarılan filmin kalınlığı arttıkça, direnci azalmaktadır. Fotolüminesans veren örnekte mikrokristallerin boyutu küçük, gözeneklilik ise büyüktür. Örneğin yüzeyinden film çıkarıldıkça mikrokristallerin boyutu büyüyecek ve gözeneklilik azalacaktır. Mikrokristallerin boyutu büyüyünce direnç küçülecektir. Bu, gözeneklilik azaldıkça kalınlığın azaldığını göstermektedir.



Şekil 3.3 Gözenekli silisyum filminin direncinin kalınlıkla değişimi

Fotoluminesans şiddetinin tavlama sıcaklığı ile ($T=80^{\circ}\text{C}$, $t=240\text{dak.}$; $T=140^{\circ}\text{C}$, $t=210\text{dak.}$; $T=190^{\circ}\text{C}$, $t=60\text{dak.}$) değişimi incelenmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça fotoluminesans şiddetinin kaybolma süreleri küçülmektedir. 80°C 'de tavlama süresi 240dak., 140°C 'de tavlama süresi 210dak., 190°C 'de ise tavlama süresi 60 dakikadır. Fotoluminesans şiddetinin tavlama ile azalmasını, filmin kompozisyonunda tavlama ile oluşan değişime bağlamak mümkündür. Bu problemi araştırmak için filmlerin optik spektrumlarının tavlama ile değişimleri incelenmiştir.

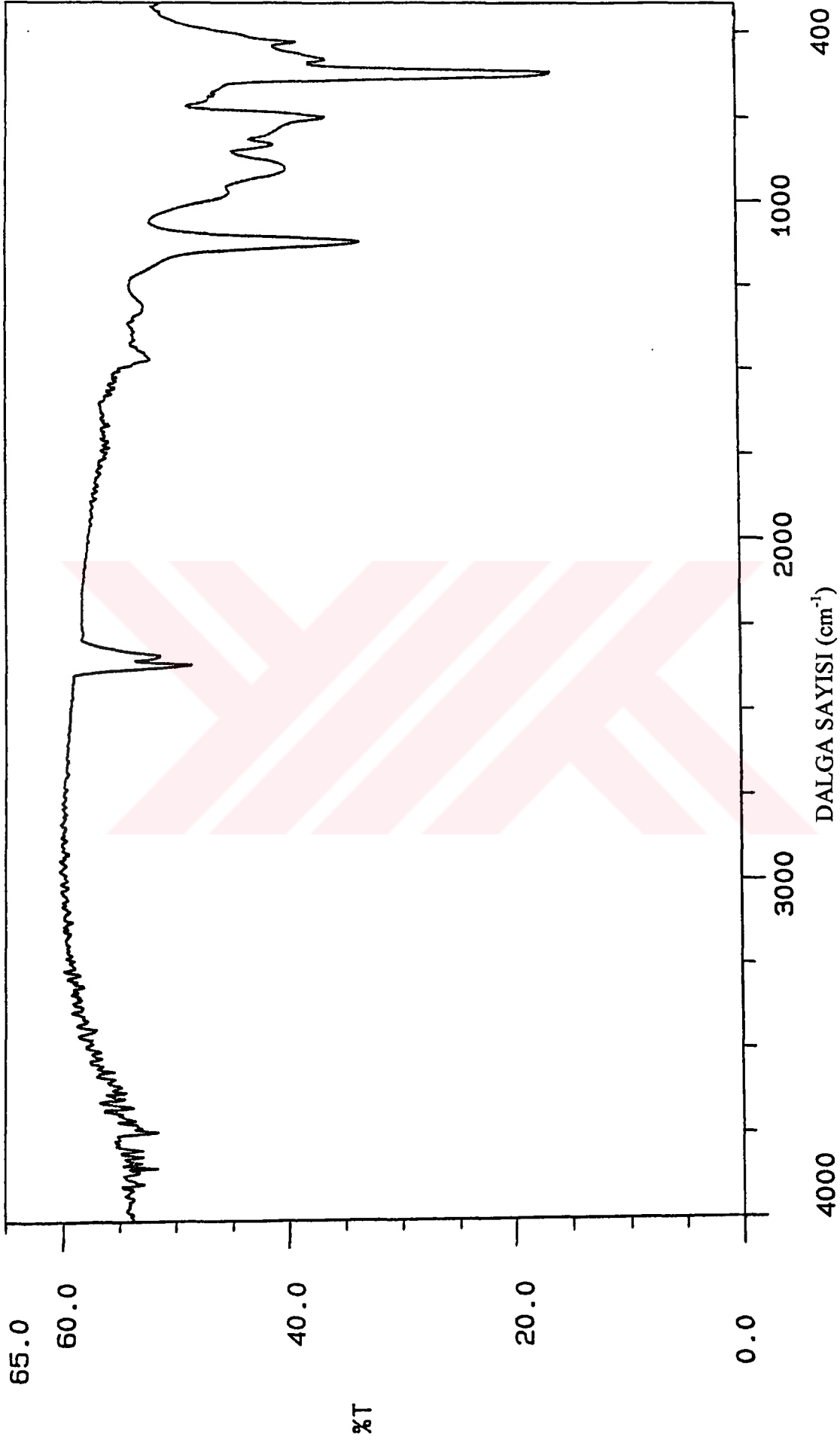
3.2 Gözenekli Silisyumun Optik Spektrumlarının İncelenmesi

Şekil 3.4 'de tek kristalli silisyuma ait $T=f(\nu)$ eğrisi verilmiştir.

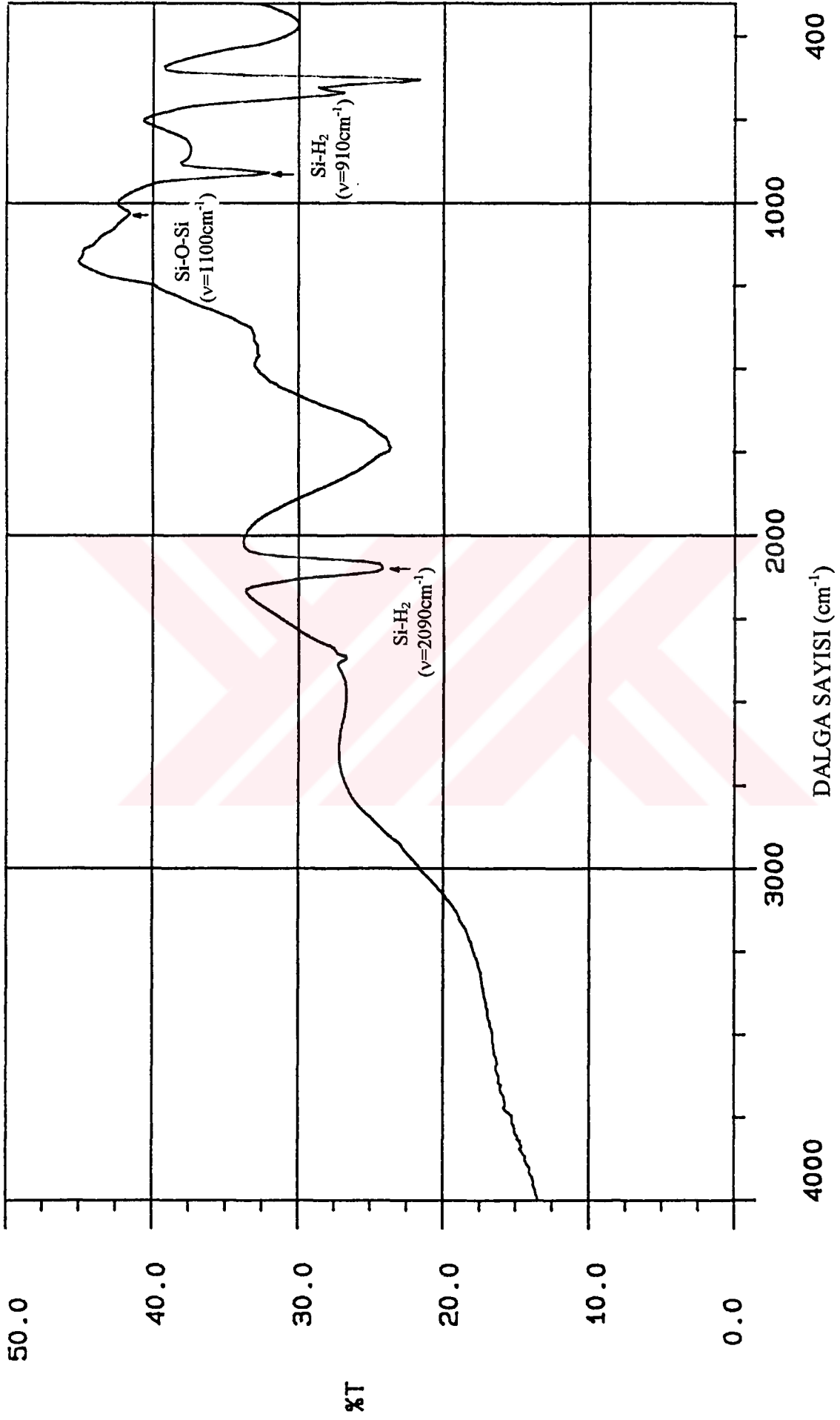
Şekil 3.5-6, Şekil 3.7-8, Şekil 3.9-10'da gözenekli silisyum örneğinden ayrılmış gözenekli filmlerin ($d=20\mu\text{m}$) tavlamadan önce ve tavlamadan sonraki (190°C , 140°C ve 80°C sıcaklıklarında) optik spektrumları verilmiştir. Bu spektrumlarda, $\nu=1100\text{cm}^{-1}$ 'de Si-O-Si'ye (asimetrik gerilme modu), $\nu=910\text{cm}^{-1}$ 'de SiH₂'ye (makaslama modu) ve $\nu=2090\text{cm}^{-1}$ 'de SiH₂ 'ye (gerilme modu) karşılık gelen soğurma piklerinin şiddetlerinin değişimi açıkça görülmektedir (Tsai vd., 1991).

Her ölçülen sıcaklıkta tavlamadan önceki (fotoluminesans olan) ve sonraki (fotoluminesans olmayan) optik spektrumlar karşılaştırıldığında, Si-O-Si molekülünün titreşim piklerinin şiddetinin arttığı ve Si-H₂ moleküllerinin titreşim piklerinin şiddetinin azaldığı görülmektedir.

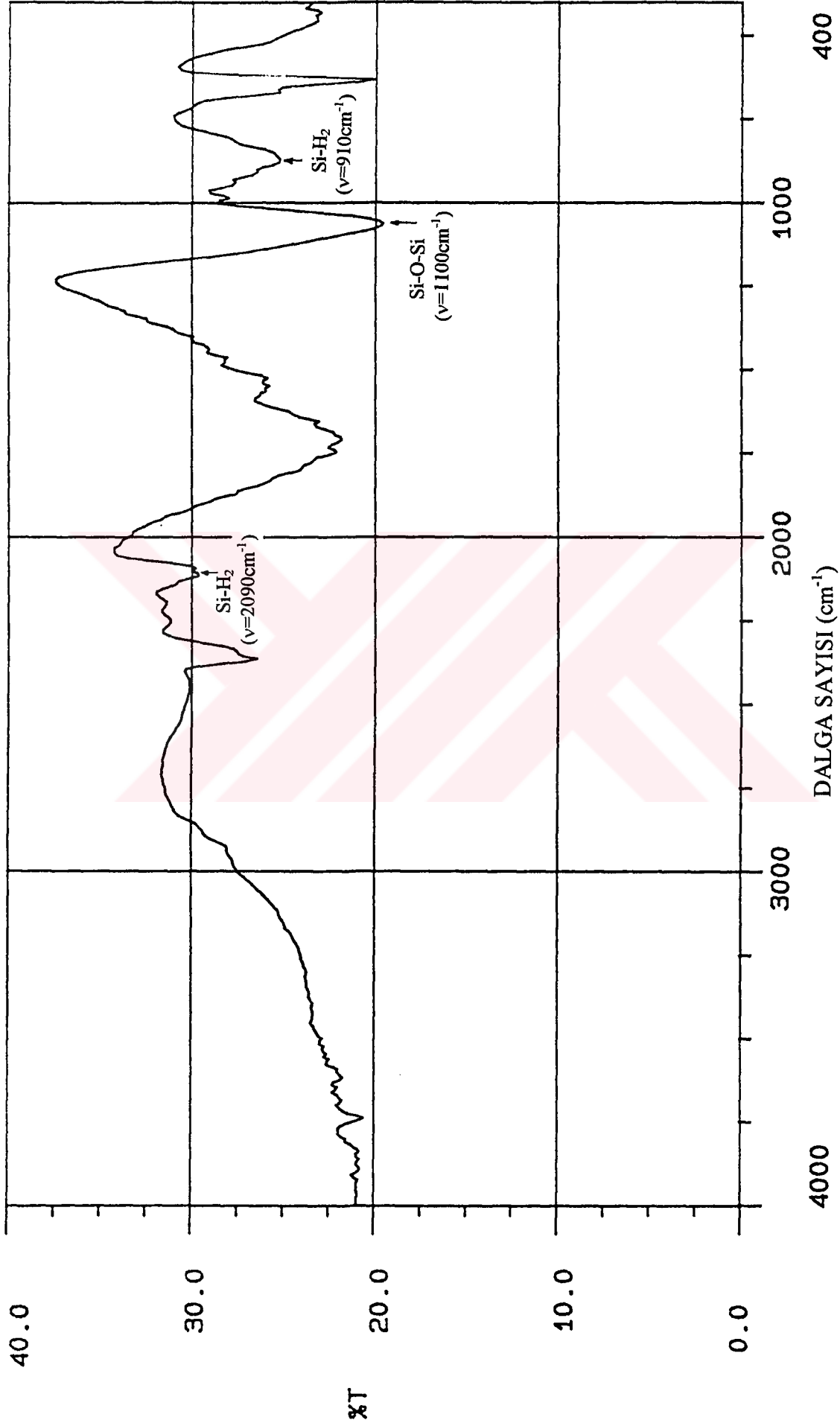
Şekil 3.11-12-13, $T=190^\circ\text{C}$; Şekil 3.14-15-16, $T=140^\circ\text{C}$ ve Şekil 3.17-18, $T=80^\circ\text{C}$ tavlama sıcaklıkları için Si-O-Si ve Si-H₂ titreşim piklerinin soğurma katsayılarının tavlama zamanıyla değişimlerini göstermektedir. Tüm incelenen sıcaklıklarda Si-O-Si titreşim piklerinin ($\nu=1100\text{cm}^{-1}$) tavlama zamanıyla $\Delta\alpha \sim t^{0.5-0.6}$ kuralı ile arttığı, Si-H₂ titreşim piklerinin ($\nu=910\text{cm}^{-1}$ ve $\nu=2090\text{cm}^{-1}$) tavlama zamanıyla $\Delta\alpha \sim t^{-0.5}$ kuralı ile azaldığı görülmektedir.



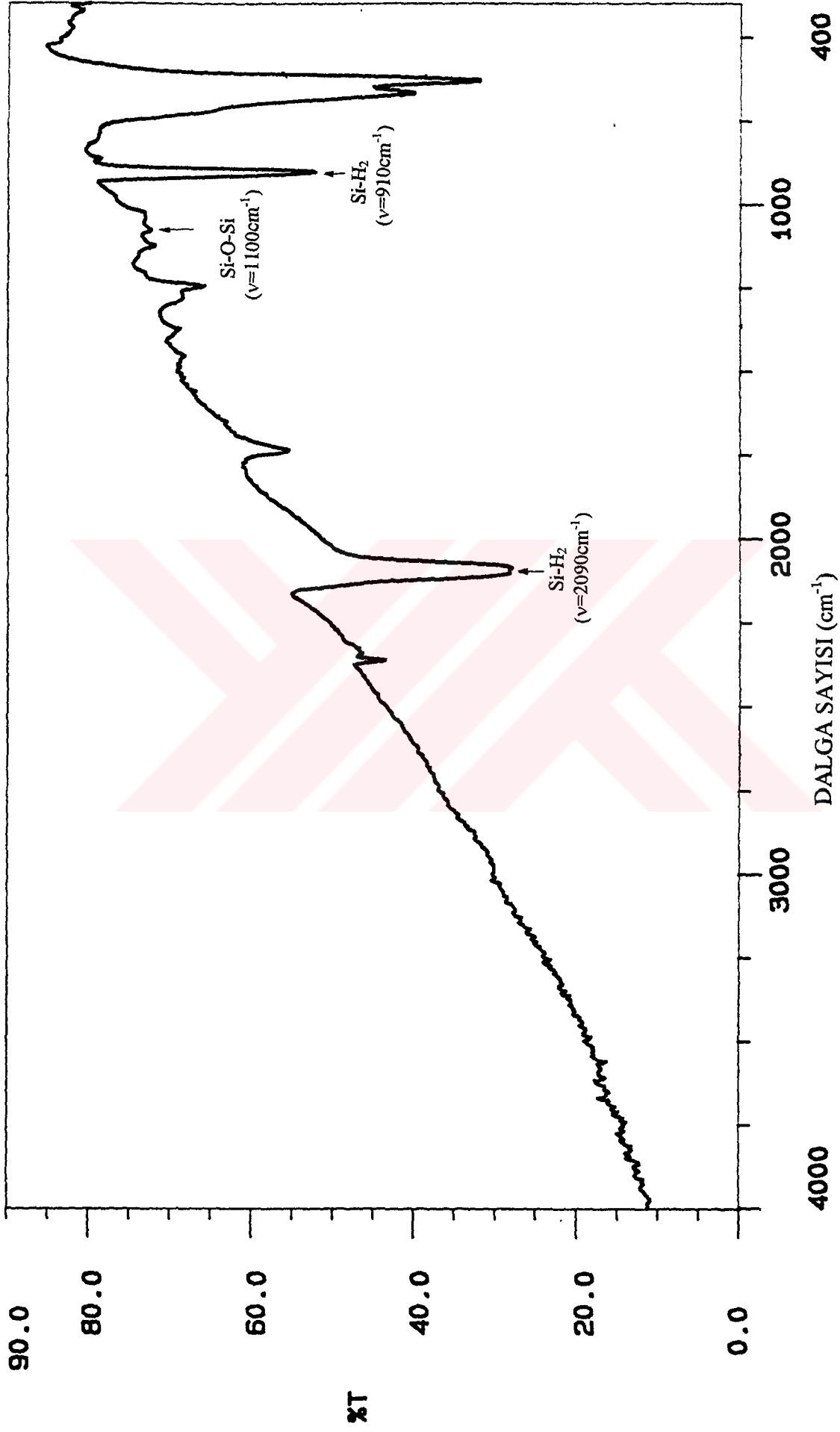
Şekil 3.4 Tek kristalli silisyumun FTIR' da elde edilen geçirgenlik spektrumu



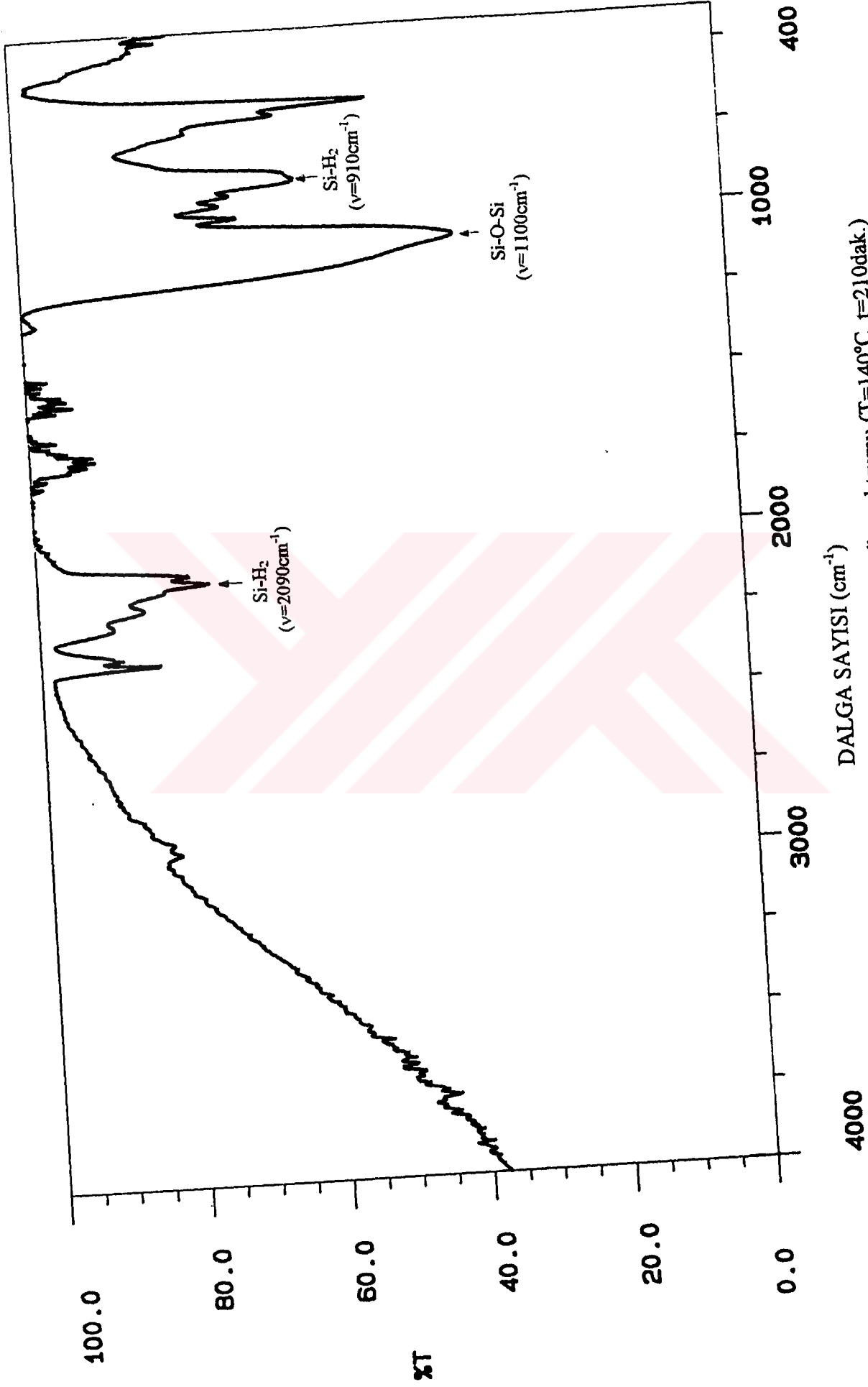
Şekil 3.5 Gözenekli silisyum filminin tavlama öncesi optik spektrumu



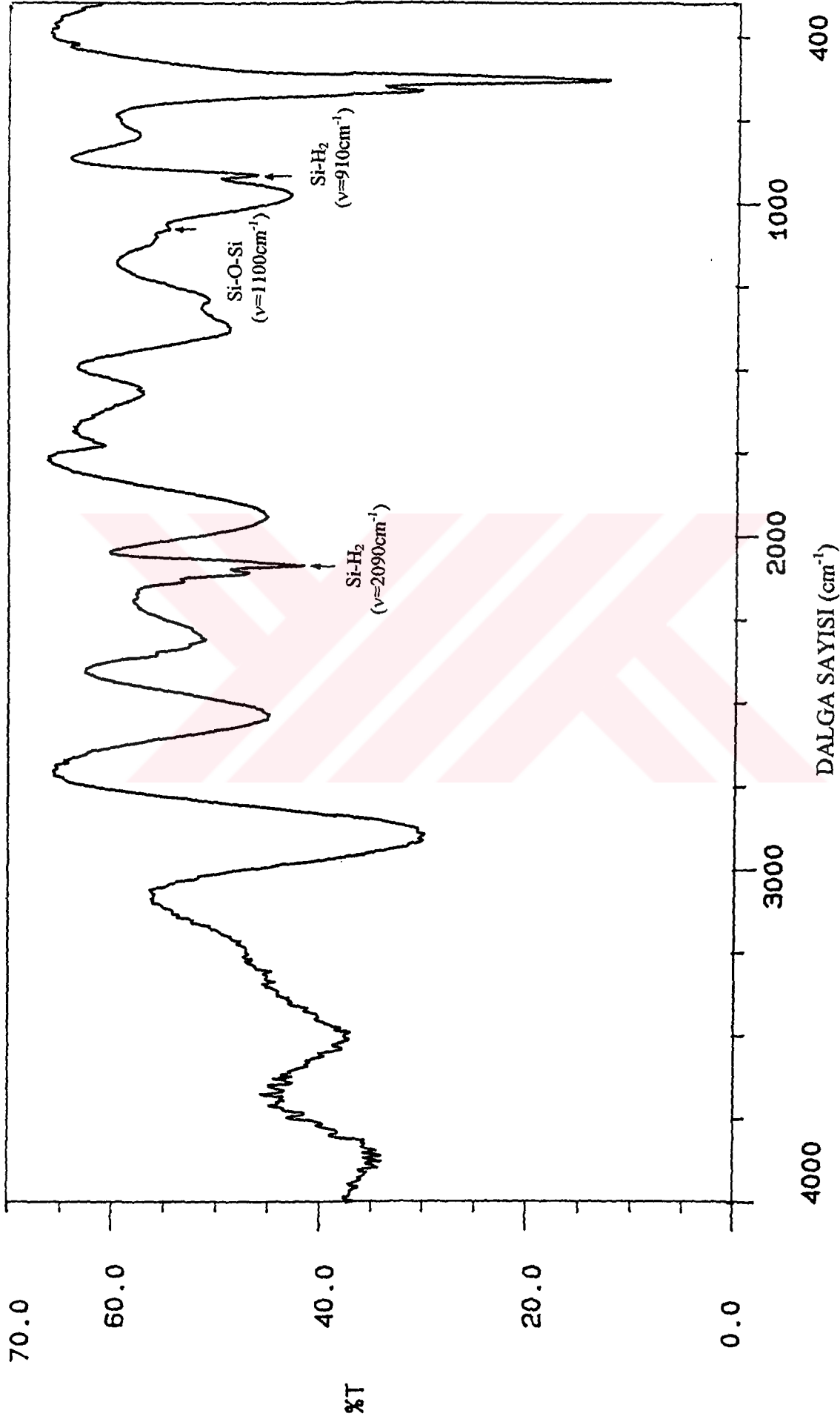
Şekil 3.6 Gözenekli silisyum filminin tavlama sonrası optik spektrumu (T=190°C, t=60dak.)



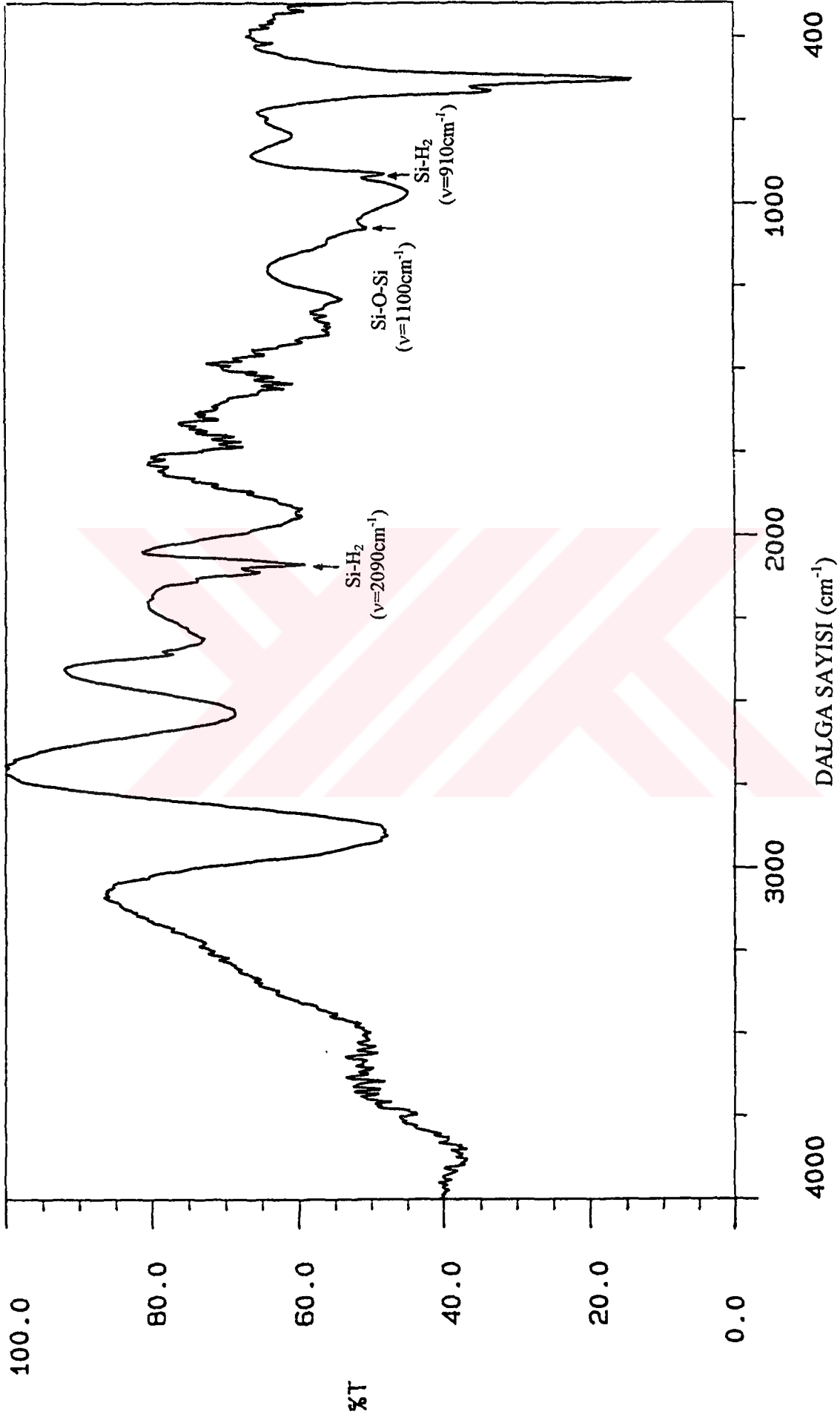
Şekil 3.7 Gözenekli silisyum filminin tavlama öncesi optik spektrumu



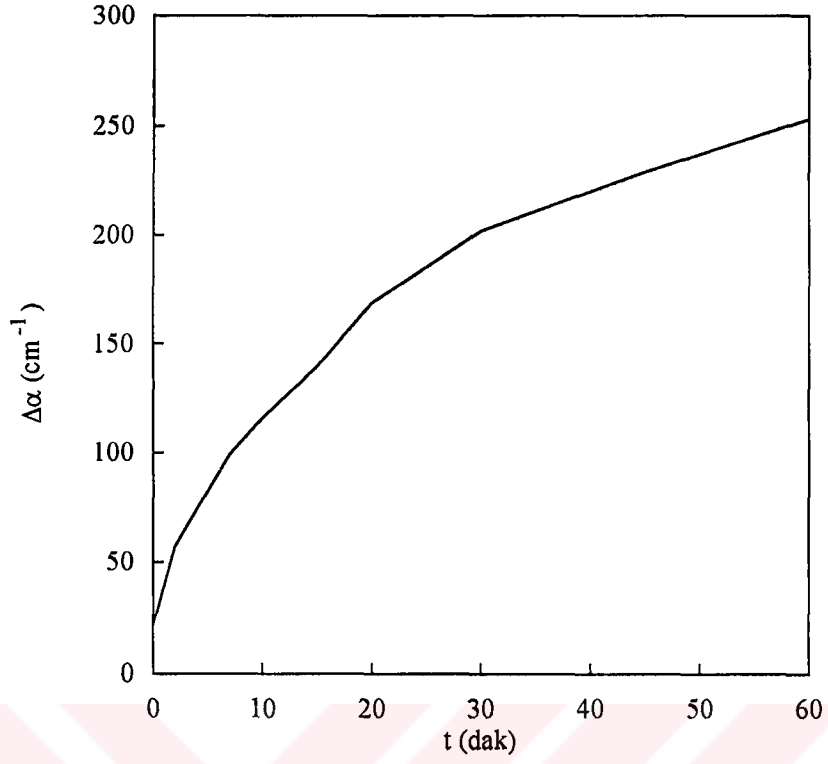
Şekil 3.8 Gözenekli silisyum filminin tavlama sonrası optik spektrumu ($T=140^{\circ}\text{C}$, $t=210\text{dak.}$)



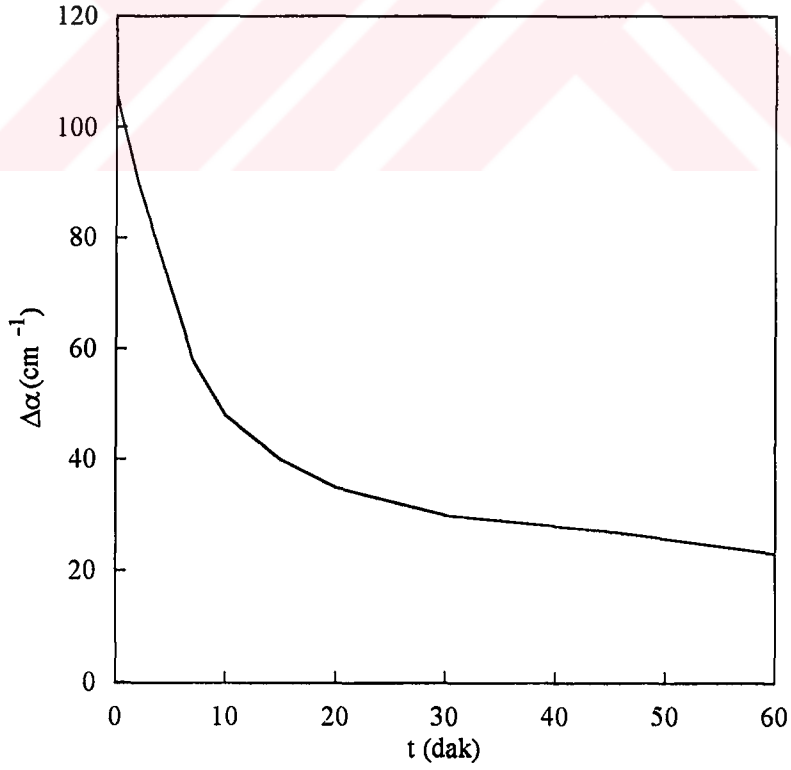
Şekil 3.9 Gözenekli silisyum filminin tavlama öncesi optik spektrumu



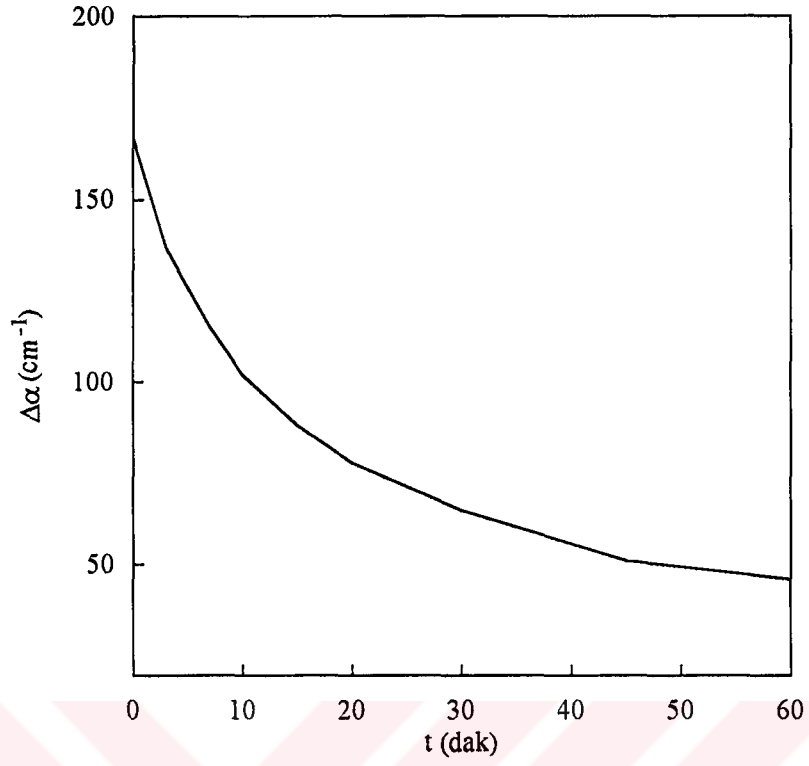
Şekil 3.10 Gözenekli silisyum filminin tavlama sonrası tavlama sonrası optik spektrumu (T=80°C, t=240dak.)



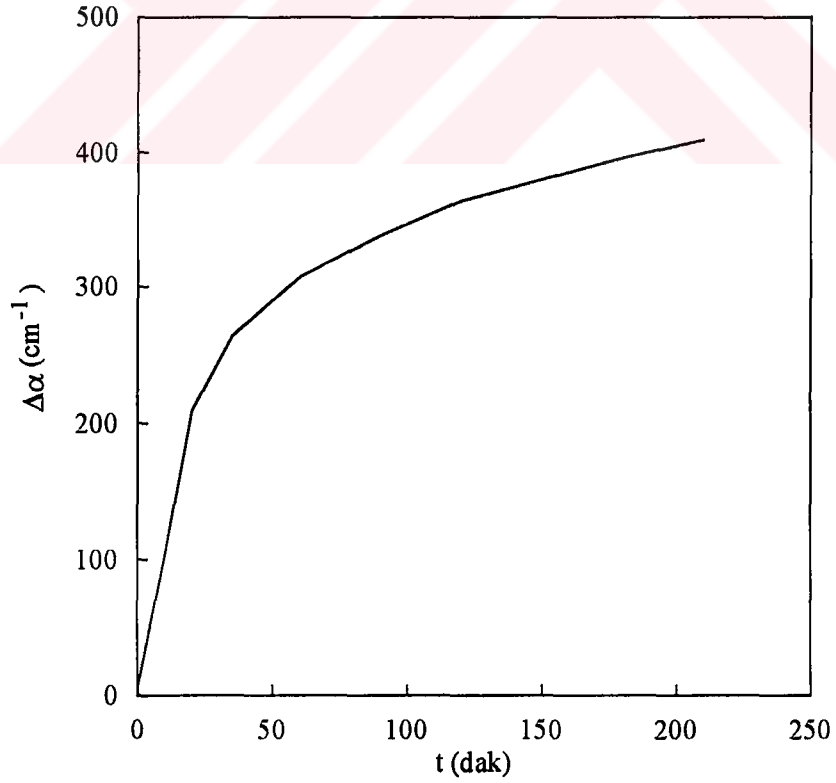
Şekil 3.11 Si-O-Si pikinin ($\nu=1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=190^\circ\text{C}$)



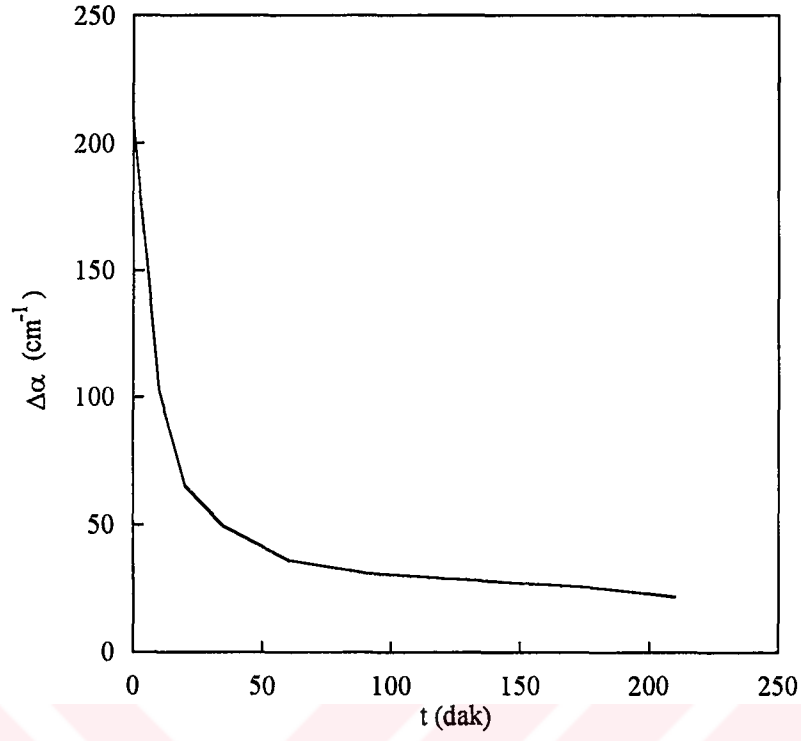
Şekil 3.12 Si-H₂ pikinin ($\nu=910\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=190^\circ\text{C}$)



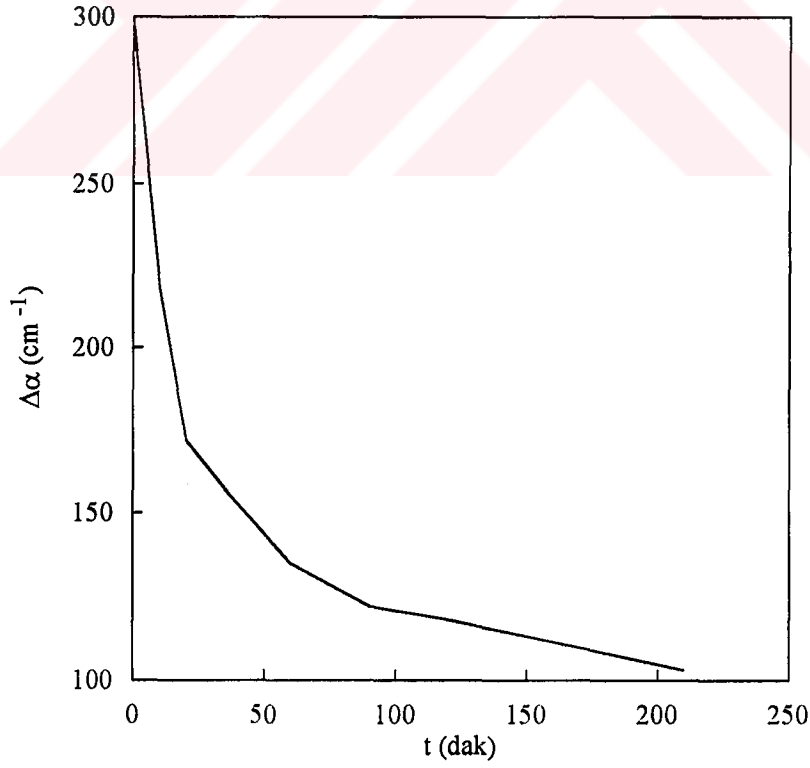
Şekil 3.13 Si-H₂ pikinin ($\nu=2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=190^\circ\text{C}$)



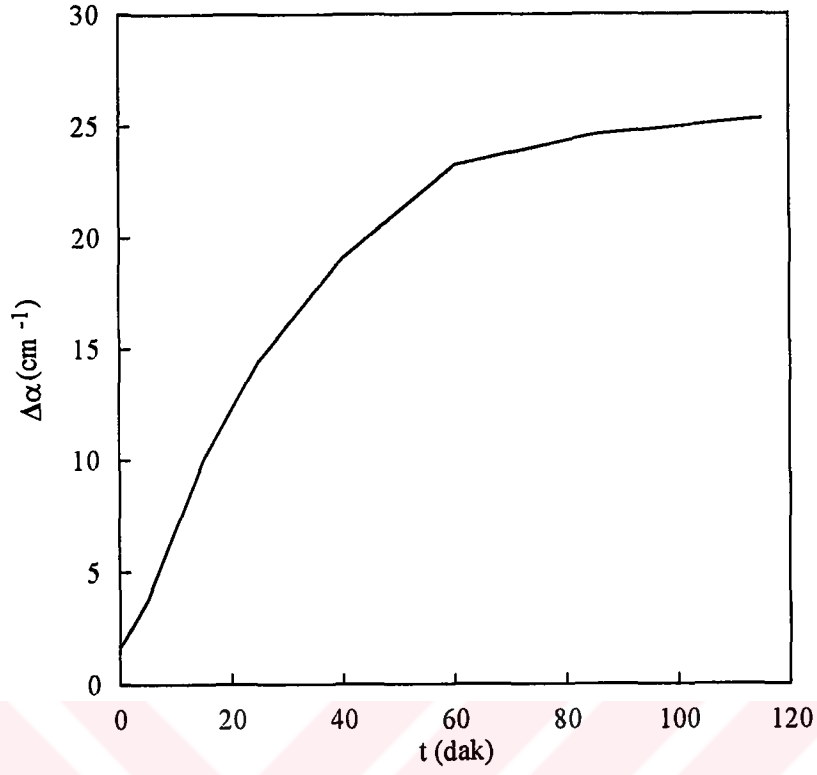
Şekil 3.14 Si-O-Si pikinin ($\nu=1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=140^\circ\text{C}$)



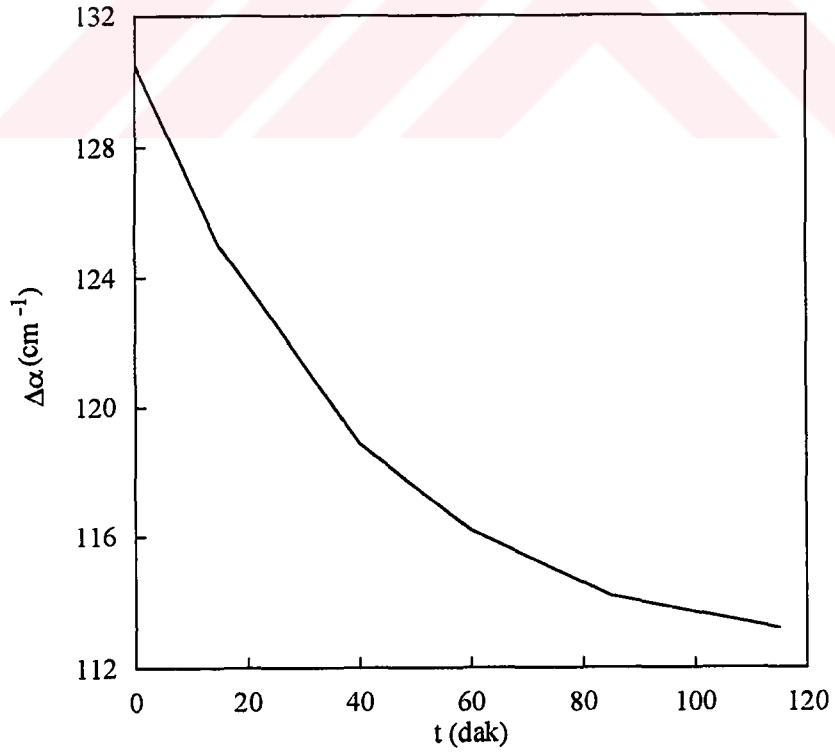
Şekil 3.15 Si-H₂ pikinin ($\nu=910\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=140^\circ\text{C}$)



Şekil 3.16 Si-H₂ pikinin ($\nu=2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=140^\circ\text{C}$)

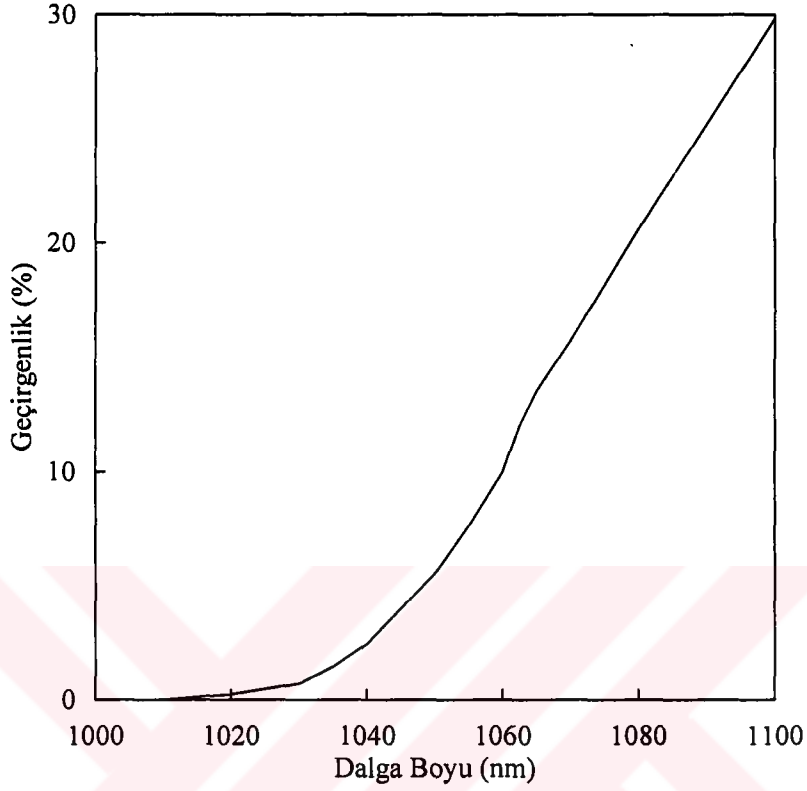


Şekil 3.17 Si-O-Si pikinin ($\nu=1100\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=80^\circ\text{C}$)



Şekil 3.18 Si-H₂ pikinin ($\nu=2090\text{cm}^{-1}$) soğurma katsayısının tavlama zamanıyla değişimi ($T=80^\circ\text{C}$)

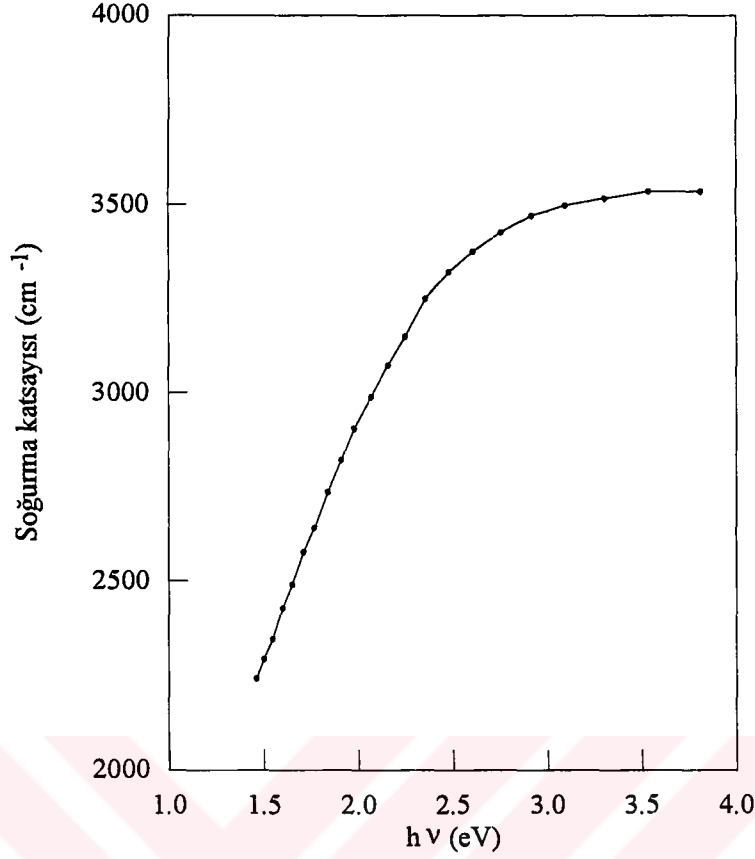
Şekil 3.19'da tek kristalli Si'un kısa dalga boylarında ölçülen $T=f(\lambda)$ eğrisi verilmiştir. Bu eğriden Si'un yasak enerji aralığının yaklaşık 1.2eV olduğu bulunmuştur.



Şekil 3.19 Tek kristalli silisyumun geçirgenlik spektrumu

Gözenekli silisyumun yasak enerji aralığını bulmak için, gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılmış $d=10\mu\text{m}$ kalınlığındaki filmin $T=f(\lambda)$ eğrisinden yararlanarak soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki grafiği çizilmiştir (Şekil 3.20). Eğri yardımıyla gözenekli silisyumun yasak enerji aralığının yaklaşık 2 eV olduğu bulunmuştur. Bu ise turuncu renge karşılık gelmektedir.

Yüzeyden ayrılmış bu filme tavlama verildiğinde geçirgenliğinin yaklaşık iki kat arttığı gözlenmiştir.



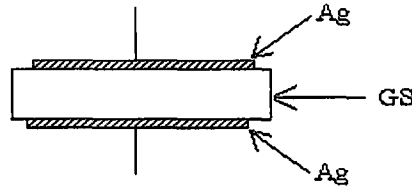
Şekil 3.20 Altlıktan ayrılmış gözenekli silisyumun soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki ilişki

Böylece, gözenekli filmlerin tavlamadan önce ve sonraki uzun dalga boyutlu titreşim spektrumlarından ve fotoluminesans ölçümlerinden görüldüğü gibi, tavlamanın neticesinde ($T_1 = 80^\circ\text{C}$, $t_1 = 240\text{dak.}$; $T_2 = 140^\circ\text{C}$, $t_2 = 210\text{dak.}$ ve $T_3 = 190^\circ\text{C}$, $t_3 = 60\text{dak.}$) Si-O-Si moleküllerinin titreşim pikinin soğurma katsayısı artar. Halbuki, Si-H₂ moleküllerinin titreşim piklerinin soğurma katsayıları küçülür. Aynı anda, tavlama ile gözenekli silisyumda fotoluminesans da kaybolur. Bu sonuçlar, gözenekli silisyumun görünür spektrumdaki fotoluminesans olayının, filmdeki Si-H₂ moleküllerinin varolmasına sıkı bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Bundan başka, gözenekli silisyum filmlerin soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki ilişkiden yasak band genişliğinin yaklaşık 2 eV olduğu bulundu.

3.3 Gözenekli Silisyum Yapıların Elektriksel Özellikleri

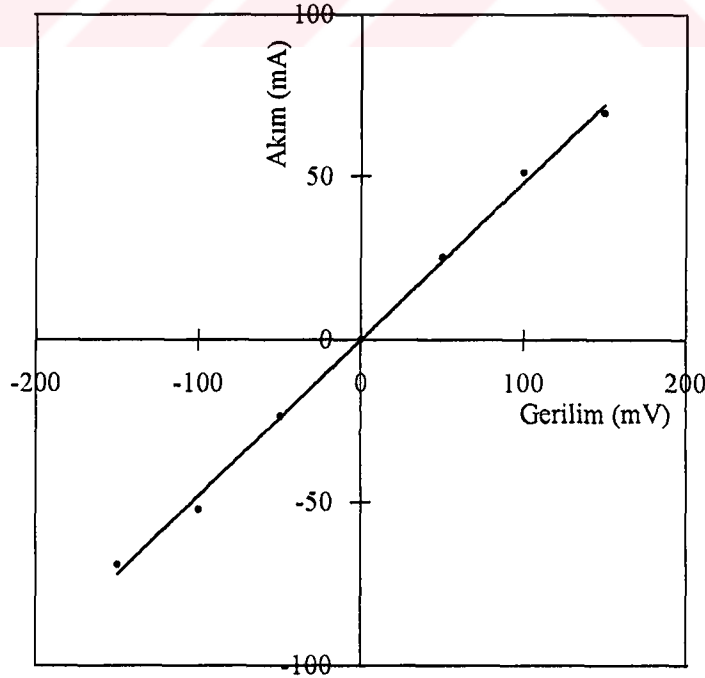
3.3.1 Gözenekli silisyumun öz direncinin incelenmesi

Gözenekli silisyum oluşturulduktan sonra akım yoğunluğu yüksek değerlere artırılarak silisyum yüzeyinden film kopması sağlandı. Yüzeiden ayrılan bu film tabakasının ($d=30\mu\text{m}$) her iki yüzeyine de Şekil 3.21’de gösterildiği gibi Ag kontaklar yapıldı.



Şekil 3.21 Gözenekli silisyum film yüzeylerine yapılan kontaklar

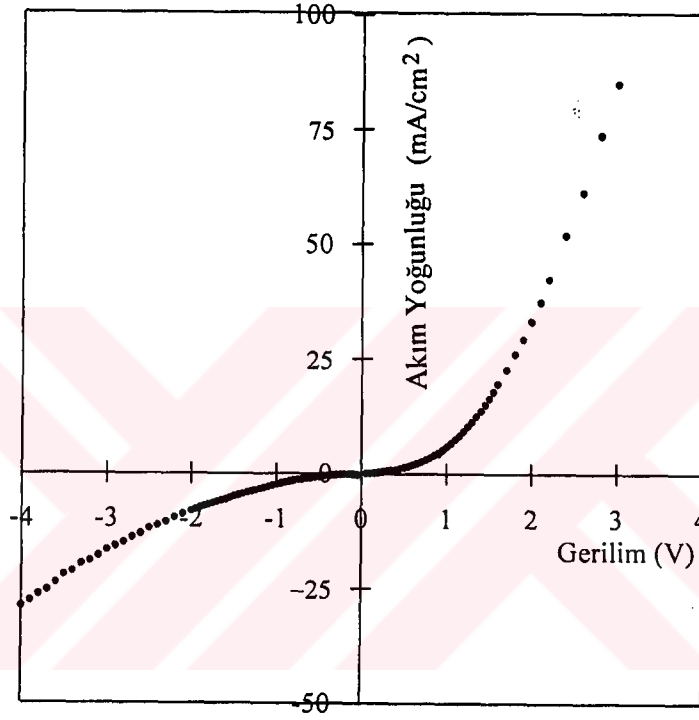
Gözenekli silisyum filminin her iki yüzeyinde bulunan Ag kontaklar arasında akım-gerilim karakteristiği elde edildi (Şekil 3.22). Çizilen I-V eğrisinin eğiminden filmin direnci $R \approx 2\Omega$, öz direnci ise $\rho \approx 42\Omega\text{cm}$ olarak hesaplandı.



Şekil 3.22 Gözenekli silisyum filminin akım-gerilim karakteristiği

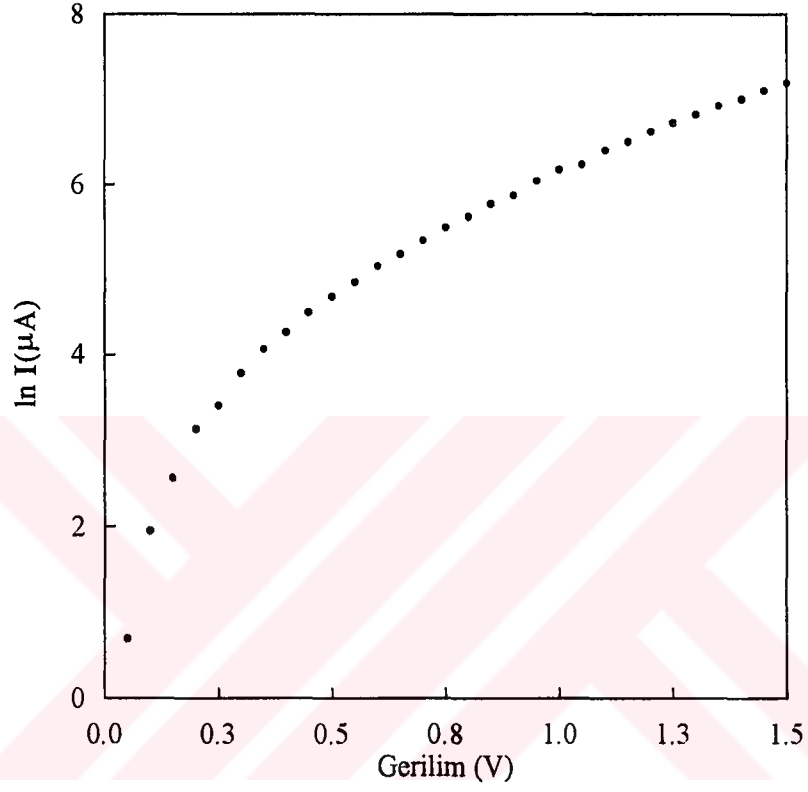
3.3.2 Al-GS-Si yapıların akım-gerilim karakteristikleri

Şekil 2.2’de gösterildiği gibi gözenekli silisyum yüzeyine kaplanan Al kaplama ile arka yüzeydeki Ag kontak arasında oda sıcaklığında karanlıkta akım-gerilim karakteristiği ölçüldü. Elde edilen bu değerlerle akım yoğunluğu (J) ile gerilim (V) arasındaki eğri çizildi (Şekil 3.23).



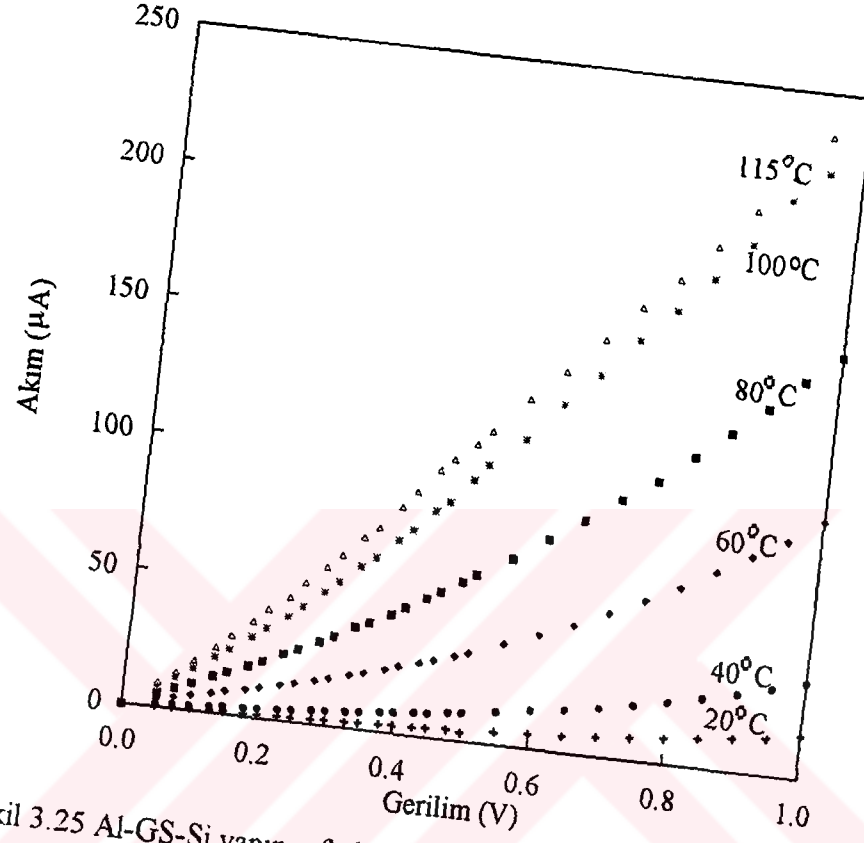
Şekil 3.23 Al-GS-Si yapının karanlıkta akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği T=300 K

n ideallik faktörünün belirlenmesi için karanlıkta, doğru yöndeki akım-gerilim karakteristikleri ölçülerek $\ln I$ ile (V) arasında grafik çizildi (Şekil 3.24). Bu eğriden ve (2.3) bağıntısından yararlanarak ideallik faktörleri $n = 2.87$ ($V = 0 - 0.3V$), $n = 10$ ($V = 0.3 - 0.8V$) ve $n = 18$ ($V = 0.8 - 1.5V$) olarak hesaplandı.



Şekil 3.24 Al-GS-Si yapının karanlık ve doğru yöndeki akım-gerilim karakteristiği
T=300 K

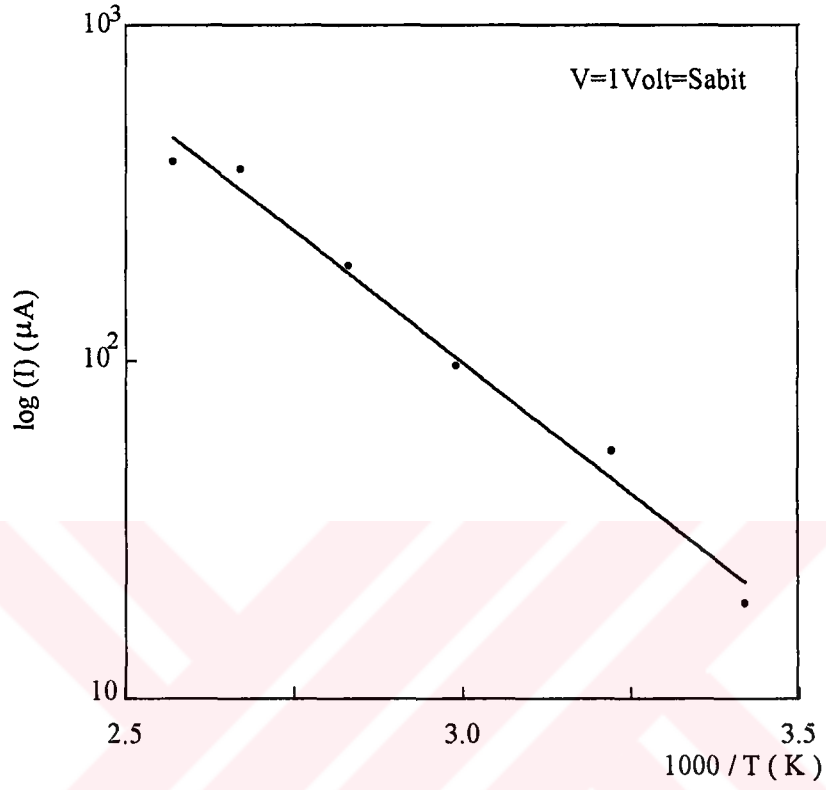
Farklı sıcaklıklarda Al-GS-Si yapının karanlıkta, ters yöndeki akım-gerilim karakteristikleri ölçüldü. Şekil 3.25'de 20°C, 40°C, 60°C, 80°C, 100°C ve 115°C 'de ölçülmüş I-V karakteristiği verilmiştir.



Şekil 3.25 Al-GS-Si yapının farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği

Bu eğriden sıcaklık arttıkça akım değerlerindeki artışı gözlendi.

Φ_B engel yüksekliğinin hesaplanması için $V=1\text{ Volt}=\text{sabit}$ gerilimindeki akım değerleri ile $1000/T$ sıcaklıkları arasındaki grafik çizildi (Şekil 3.26).



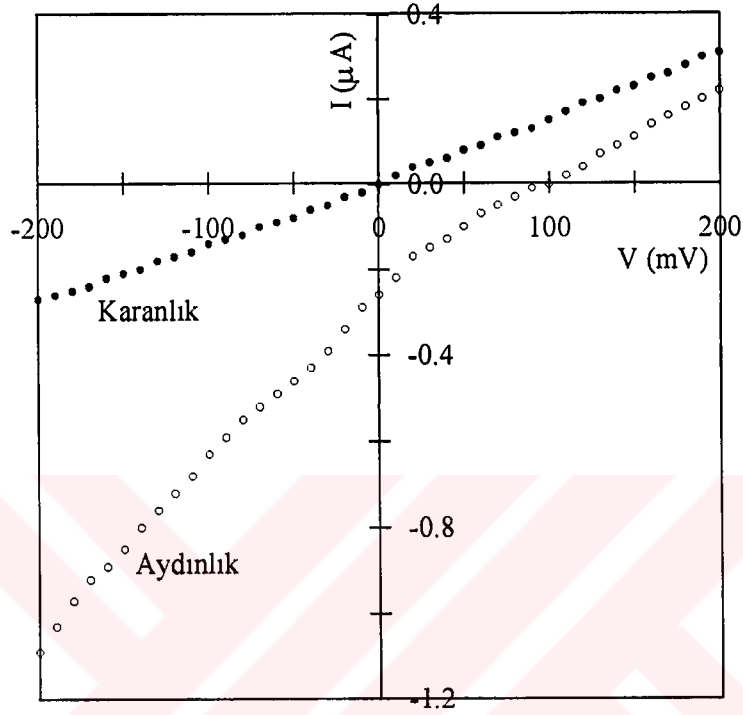
Şekil 3.26 Doyma akımının sıcaklıkla değişimi

Bu eğriden ve (2.2) bağıntısından yararlanarak engel yüksekliği,

$$\Phi_B = 0.3\text{eV}$$

olarak hesaplandı.

Al-GS-Si yapının karanlık ve 50W tungsten lamba ışığı altında ölçülen I-V karakteristikleri incelendi (Şekil 3.27). Bu eğriden, 50W tungsten lamba ile örnek aydınlatıldığında ışığın etkisi açıkça gözlenir.



Şekil 3.27 Al-GS-Si yapının karanlık ve aydınlıktaki I-V karakteristiği.

Şekil 3.27'den görüldüğü gibi, Al-GS-Si heteroyapı fotovoltajik özelliği gösterir. Bu fotopilin açık devre gerilimi $V_{OC} = 100\text{mV}$ ve kısa devre fotoakımı $I_{SC} = 0.25\mu\text{A}$ 'dir.

4. SONUÇLAR

Tek kristalli silisyum yüzeyinde elektrokimyasal anodizasyon yöntemiyle hazırlanan gözenekli silisyum filmlerin tavlamadan ($T=200^{\circ}\text{C}$, $t=5\text{dak.}$) önce ve sonraki fotolüminesans spektrumları karşılaştırıldığında her iki spektrumun genel görünüm olarak birbirine benzemesine rağmen, tavlamadan sonra fotolüminesans şiddetinin %50 oranında azaldığı ve spektrumun yarı genişliğinin bir miktar arttığı görüldü (Şekil 3.1 ve 3.2).

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, fotolüminesans veren gözenekli silisyumun toplam kalınlığına bağlı olarak fotolüminesans verdiği bölgenin büyüklüğü hakkında etraflı bilgilere erişilememiştir. Bu çalışmada, gözenekli silisyum filmin fotolüminesans veren bölgesinin tüm filmin kalınlığının yaklaşık % 40'ında yer aldığı belirlendi (Çizelge 3.1). Bu belirleme işlemi, gözenekli silisyum yüzeyinden mekanik aşındırma ile seri olarak ince filmler çıkartılarak yapıldı. Gözenekli silisyum yüzeyinde % 40'luk aşındırmaya kadar fotolüminesans gözlenmesine karşılık, daha fazla aşındırmalarda ise fotolüminesans gözlenmediği anlaşıldı. Bunun nedeni, yüzeye yakın bölgelerde gözenekliliğinin daha büyük, silisyumun derinliğine doğru ise gözeneklilik küçüldüğünden örneklerin yüzeye yakın kısımlarının lüminesans verdiği şeklinde yorumlandı. Bu ise, gözenekli silisyum yapının kalınlığının homojen olmadığını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 3.3'den görüldüğü gibi gözenekli silisyum yüzeyinden mekanik aşındırma ile çıkarılan film kalınlığı arttıkça gözenekli silisyum filmin direnci azalmaktadır. Bunun nedeni ise, örnek yüzeyinden film çıkarıldıkça mikrokristallerin boyutu büyüdüğünden direncin küçüleceği şeklinde yorumlandı.

Gözenekli silisyum filmlerin yansımaya katsayısının (R) hesaplanması da, bir çalışmanın haricinde (Schirone, 1996) literatürde bulunamamıştır. Bizim çalışmamızda, silisyum altlıktan ayrılmış gözenekli silisyum filminin (kalınlığı yaklaşık $20\mu\text{m}$) optik geçirgenlik spektrumlarından yansımaya katsayısı $R=0.03$ olarak hesaplandı (Şekil 2.5). Bu sonuç ise yukarıda sözü edilen çalışmanın sonucu ile uyumludur.

Tavlamadan önce (Şekil 3.5) ve $T=190^{\circ}\text{C}$ deki tavlama işleminden sonra (Şekil 3.6), gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılmış filmlerin uzun dalga boylarında ölçülen optik

spektrumlarından $\nu=1100\text{cm}^{-1}$ deki Si-O-Si molekülünün titreşim pikinin şiddetinin arttığı, oysa $\nu=910\text{cm}^{-1}$ ve $\nu=2090\text{cm}^{-1}$ deki Si-H₂ moleküllerinin titreşim piklerinin şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bu işlemler, T=140°C (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8) ve T=80°C (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10) tavlama sıcaklıklarında da tekrarlandı ve benzer sonuçlar elde edildi. Aynı zamanda, T=190°C tavlama sıcaklığında yapılan incelemelerden, Si-O-Si molekülünün titreşim pikinin soğurma katsayısının tavlama zamanı ile arttığı (Şekil 3.11) ve Si-H₂ moleküllerinin titreşim piklerinin soğurma katsayılarının tavlama zamanı ile azaldığı (Şekil 3.12 - 3.13) gözlenmiştir. Benzer sonuçlar, T=140°C (Şekil 3.14 - 3.15 - 3.16) ve T=80°C (Şekil 3.17 - 3.18) tavlama sıcaklıklarında da görülmüştür. Gözenekli silisyum filmlerindeki Si-O-Si ve Si-H₂ moleküllerinin optik titreşim ve fotoluminesans spektrumlarının tavlama sıcaklığı ile tavlama zamanına bağlı incelemelerinden, luminesans olayının gözenekli silisyumdaki Si-H₂ moleküllerinin varlığına bağlı olduğu sonucuna varıldı.

Yasak enerji aralıkları tek kristalli silisyum için Şekil 3.19'dan yaklaşık 1.2 eV ve gözenekli silisyum filmi için Şekil 3.20'den yaklaşık 2 eV olarak hesaplandı.

Literatürde, gözenekli silisyumdan ayrılmış filmin öz direnci ile ilgili bilgi yoktu. Gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılmış filmin her iki yüzeyine yapılan Ag kontak yardımıyla elde edilen I-V eğrisinden (Şekil 3.22) kontakın omik olduğu belirlendi. Yapılan bu ölçüm sonuçlarından, gözenekli silisyum yüzeyinden ayrılmış filmin öz direnci yaklaşık 42 Ωcm olarak hesaplandı.

Gözenekli silisyum ve silisyum, farklı yasak enerji aralığına sahip iki malzeme olduklarından, heteroeklem özellik gösterebilirler. Gözenekli silisyum - tek kristalli silisyum eklemlerin elektriksel ve fotovoltajik ölçümlerinden, bu heteroeklemlerin doğrultucu özellik gösterdiği ve gözenekli silisyum - silisyum arasındaki potansiyel engel yüksekliğinin $\Phi_B = 0.3$ eV olduğu belirlendi (Şekil 3.26). Bu devrenin fotovoltajik parametreleri ise açık devre gerilimi $V_{OC} = 100$ mV ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{SC} = 5$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçüldü (Şekil 3.27). Bu değerlerden de, eklemlerin fotopil özelliklerini gösterdiği sonucuna varıldı.

Turuncu fotolüminesans veren (Şekil 2.6) ve tavlama ile bu özelliğini yitiren (Şekil 2.7) örneklerin elektron mikroskobu ile alınan görüntülerinden, fotolüminesans veren örnekte mikrokristallerin boyutunun küçük, diğerlerinde ise daha büyük olduğu gözlemlendi. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, tavlamadan sonra gözenekliliğin azaldığı sonucuna varıldı.

Bu çalışmada, literatürde sıkça rastlanmayan gözenekli silisyumdan ayrılmış filmin yansıma katsayısı, özdirenci, yasak enerji aralığı ve gözenekli silisyum kalınlığının yaklaşık % 40'ının lüminesans vermesi ile bilgi ve sonuçlar ilk defa elde edildi. Ayrıca, gözenekli silisyum-tek kristalli silisyum yapıların heteroeklem gibi davrandığı ve bu eklemlerin fotopil gibi kullanılabilceği anlaşıldı.

Sonuç olarak, bugüne kadar yapılan çalışmalarda, gözenekli silisyumda fotolüminesans olayının geniş olarak incelenmesine rağmen elektrolüminesans olayına çok az değinildiği gözönüne alınarak, bu malzemenin elektrolüminesans özelliklerinin incelenmesinin yararlı olabileceği düşünülebilir.

KAYNAKLAR

Akpınar, S., (1977), Katihal Fiziğinden Seçme Konular 5, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi

Akpınar, S., (1979), Yarıiletkenler Fiziği , İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi

Azaroff, L.V. ve Brophy, J.J., (1963), Electronic Processes in Materials, McGraw-Hill, Inc., USA

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

Bomchil, G., Halimaoui, A. ve Herino, R., (1992), Appl.Surf.Sci., 41, 604

Bressers, M.M.C., Knapen, J.W.J., Meulenkamp, E.A. ve Kelly, J.J., (1992), Apply.Phys.Lett., 61, 108

Buda, F., Kohanoff, J. ve Parrinello, M., (1992), "Optical Properties of Porous Silicon: A First-Principles Study", Phys.Rev.Lett., 69 (8), 1272-1275

Canham, L.T., (1990), "Silicon Quantum Wire Array Fabrication by Electrochemical and Chemical Dissolution of Wafers", Appl.Phys.Lett., 57 (10): 1046-1048

Canham, L.T., Houlton, M.R., Leong, W.Y., Pickering, C. ve Keen, J.M., (1991), J.Appl.Phys., 70: 422

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

Collins, R.W., Tsai, C.C., Hirose, M., Koch, F. ve Brus, L., (1995), "Microcrystalline and Nanocrystalline Semiconductors", Symp.Proc.vol.358, Materials Research Society, Pittsburgh

Collins, R.T., Fauchet, P.M. ve Tischler, M.A., (1997), "Porous Silicon: From Luminescence to LEDs", Physics Today, 50 (1): 24-31

Delerue, C., Allan, G. ve Lannoo, M., (1993), "Theoretical Aspects of the Luminescence of Porous Silicon", Phys.Rev., B48, 11024-11036

Fauchet, P.M., Tsai, C.C., Canham, L.T., Shimizu, I. ve Aoyagi, Y., (1993), "Microcrystalline Semiconductors: Materials Science and Devices", Symp.Proc.vol.283, Materials Research Society, Pittsburgh

Gardelis, S., Rimmer, J.S., Dawson, P., Hamilton, B., Kubiak, R.A., Whall, T.E. ve Parker, E.H.C., (1991), "Evidence for Quantum Confinement in the Photoluminescence of Porous

Si and SiGe", *Appl.Phys.Lett.*, 59 (17) , 2118-2120

Gezci, S., (1992), *Katıhal Fizigi* , İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul

Green, W.H., Lee, E.J., Lauerhaas, J.M., Bitner, T.W. ve Sailor, M.J., (1995), *Apply.Phys.Lett.*, 67, 1468

Halimaoui, A., (1994), *Surf.Sci.Lett.*, 306, L550

Herino, R., Bomchil, G., Barla, K., Bertrand, C. ve Ginoux, J.L., (1987), *J.Electrochem.Soc.*, 134, 1994

Iyer, S.S., Collins, R.T. ve Canham, L.T., (1992), "Light Emission From Silicon", *Sysp.Proc.vol.256*, Materials Research Society, Pittsburgh

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

John, G.C. ve Singh, V.A., (1995b), "Diffusion-Induced Nucleation Model for the Formation of Porous Silicon", *Physical Review B*, 52 (15): 11125-11131

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

Kittel, C., (1996), *Katıhal Fizigine Giriş* (Çev., B. Karaoğlu), Bigitek Yayıncılık, İstanbul

Koch, F., (1993), *Mat.Res.Soc.Proc.*, 283: 319

Lehmann, V. ve Foll, H., (1990), "Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in n-Type Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 137 (2): 653-659

Lehmann, V. ve Gosele, U., (1991), "Porous Silicon Formation- A Quantum Wire Effects", *Appl.Phys.Lett.*, 58 (8): 856-858

Lehmann, V., (1992), *Adv.Mater.*, 4: 114

Lehmann, V., Jobst, B., Muschik, T., Kux, A. ve Petrovakoch, V., (1993), "Correlation Between Optical-Properties and Crystallite Size in Porous Silicon", *Jpn.J.Appl.Phys.*, 32 (5A): 2095-2099

Lehmann, V., (1993), *J.Electrochem.Soc.*, 140, 2836

Linros, J. ve Lalic, N., (1995), *Appl.Phys.Lett.*, 66, 3048

Loni, A., Simons, A.J., Cox, T.I., Calcott, P.D.J. ve Canham, L.T., (1995), *Electronics Lett.*, 31, 1288

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

Pankove, J.I., (1971), *Optical Processes in Semiconductors*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

Pickering, C., Beale, M.I.J., Robbins, D.J., Pearson, P.J. ve Greef, R., (1984), "Optical Studies of the Structure of Porous Silicon Films Formed in p-type Degenerate and Non-Degenerate Silicon", *J.Phys.C:Solid State Phys.*, 17: 6535-6552

Read, A.J., Needs, R.J., Nash, K.J., Canham, L.T., Calcott, P.D.J. ve Qteish, A., (1992), "First-Principles Calculations of the Electronic Properties of Silicon Quantum Wires", *Phys.Lett.*, 69 (8), 1232-1235

Schirone, L., Sotgiu, G., Rallo, F. ve Califano, F.P., (1996), "Porous Silicon Coatings for Photovoltaic Devices", *Condensed Matter Atomic Molecular and Chemical Physics*, 18 (10): 1225-1232

Schuppler, S., Friedman, S.L., Marcus, M.A., Adler, D.L., Xie, Y.H., Ross, F.M., Harris, T.D., Brown, W.L., Chabal, Y.J., Brus, L.E. ve Citrin, P.H., (1994), "Dimensions of Luminescent Oxidized and Porous Silicon Structures", *Phys.Rev.Lett.*, 72 (16): 2648-2651

Searson, P.C., (1991), "Porous Silicon Membranes", *Appl.Phys.Lett.*, 59 (7): 832-833

Shur, M., (1990), *Physics of Semiconductor Devices*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

Smith, R.L. ve Collins, S.D., (1992), "Porous Silicon Formation Mechanisms", *J.Appl.Phys.*, 71 (8): R1-R22

Streetman, B.G., (1972), *Solid State Electronic Devices*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

Sze, S.M., (1981), *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York

Takagi, H., Ogawa, H., Yamazaki, Y., Ishizaki, A. ve Nakagiri, T., (1990), "Quantum Size Effects on Photoluminescence in Ultrafine Si Particles", *Appl.Phys.Lett.*, 56 (24): 2379-2380

Thönissen, M., Billat, S., Krüger, M., Lüth, H., Berger, G., Frotscher, U. ve Rossow, U., (1996), "Depth Inhomogeneity of Porous Silicon Layers", *J.Appl.Phys.*, 80 (5): 2990-2993

Tsai, C., Li, K.-H., Sarathy, J., Shih, S. ve Campbell, J.C., (1991), "Thermal Treatment Studies of the Photoluminescence Intensity of Porous Silicon", *Appl.Phys.Lett.*, 59 (22): 2814-2816

Tsybeskov, L., Duttagupta, S.P., Hirschman, K.D. ve Fauchet, P.M., (1996), Appl.Phys.Lett., 68, 2058

Turner, D.R., (1958), "Electropolishing Silicon in Hydrofluoric Acid Solutions", J.Electrochem.Soc., 105 (1): 402-408

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

Wilson, W.L., Szajowski, P.F. ve Brus, L.E., (1993), "Quantum Confinement in Size-Selected, Surface-Oxidized Silicon Nanocrystals", Science, 262 (5137): 1242-1244

Xu, Z.Y., Gal, M. ve Gross, M., (1992), Appl.Phys.Lett., 60 (11): 1375-1377

Yeh, C.Y., Zhang, S.B. ve Zunger, A., (1994), "Confinement, Surface, and Chemisorption Effects on the Optical Properties of Si Quantum Wires", Phys.Rev., B50 (19), 14405-14415

Zhang, X.G., Collins, S.D. ve Smith, R.L., (1989), "Porous Silicon Formation and Electropolishing of Silicon by Anodic Polarization in HF Solution", J.Electrochem.Soc., 136 (5): 1561-1565

ÖZGEÇMİŞ		
Doğum tarihi	Doğum yeri	
17.01.1967	İstanbul	
1981-1984		Lise
1985-1989		Lisans
1989-1992		Yüksek Lisans
1993-1999		Doktora
		Çalıştığı Kurum
1991-Devam ediyor		
		Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
		Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Araştırma Görevlisi