

**T.C.**  
**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PLAZMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ HİDROJENLENMİŞ AMORF  
SİLİSYUM KARBÜR İNCE FİLMLEİN FOTOLÜMİNESANS  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**İbrahim GÜNEŞ**

**Fizik Anabilim Dalı**

Tezin Sunulduğu Tarih: **06.01.2012**

**Tez Danışmanı:**

**Yrd. Doç. Dr. Kıvanç SEL**

**ÇANAKKALE**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**İBRAHİM GÜNEŞ** tarafından **YRD. DOÇ. DR. KIVANÇ SEL** yönetiminde hazırlanan **“PLAZMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUM KARBÜR İNCE FİLMLEİN FOTOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ”** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Kıvanç SEL

---

Danışman

Doç. Dr. Vildan BİLGİN

---

Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

---

Jüri Üyesi

Sıra No:.....

Tez Savunma Tarihi: 06 / 01 / 2012

Prof. Dr. İsmet KAYA

---

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyonu tarafından 2011/010 no'lu projeden desteklenmiştir.

## İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI

**Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.**

**İbrahim GÜNEŞ**

## TEŞEKKÜR

Gerek yüksek lisans eğitimim gerekse bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi süresince, yoğun olduğu zamanlarda bile önceliğini bana vererek gösterdiği ilgi, hoşgörü ve özverili katkı ile engin bilimsel bilgi ve birikimini benden esirgemeyen, yaşadığı tecrübe ve deneyimleri benimle paylaşarak yol gösterici olan, desteğini her zaman hissettiren ve her açıdan gelişmeye yardımcı olan, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum değerli danışmanım ve hocam Yrd. Doç. Dr. Kıvanç SEL'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İnce filmlerin büyütülmesindeki değerli katkıları için ve laboratuvar imkanlarını paylaştıkları için Prof. Dr. İsmail ATILGAN'a ve Doç. Dr. Barış AKAOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve birikimlerini paylaşan, ihtiyacım olduğunda yardımlarını esirgemeyen bölümümüz öğretim üyelerinden Doç. Dr. Vildan BİLGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreç içerisinde bu heyecanı birlikte paylaştığım, her türlü anımda yanımda bulunan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi (ÇOMÜ) Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü yüksek lisans öğrencisi değerli ev arkadaşım Emrah SARICA'ya teşekkür ederim.

Bilgi ve birikiminden faydalandığım, bilimsel tartışmalar yaptığım, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ÇOMÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü doktora öğrencisi değerli arkadaşım Barbaros DEMİRSELÇUK'a teşekkür ederim.

Gösterdikleri sabır ve fedakarlıklar ile benim bugünlere gelmemde şüphesiz en büyük emek ve katkıya sahip olan, yaşamımın her kademesinde beni destekleyen, oğulları olmaktan gurur duyduğum çok değerli ailem; babam Halil GÜNEŞ'e ve annem Feride GÜNEŞ'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, özellikle lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, üzerimde büyük emekleri olan, gösterdikleri sabır ve fedakarlıklar ile bugünlere gelmeme sağladıkları katkılardan dolayı minnet duyduğum çok değerli kardeşlerim, Ayşe GÜNEŞ ÜNAL'a; Murat GÜNEŞ'e; Kemal GÜNEŞ'e ve ailelerine sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

**İbrahim GÜNEŞ**



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

PDKBB	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
a-SiC <sub>x</sub> :H	Hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür
a-Si:H	Hidrojenlenmiş amorf silisyum
a-C:H	Hidrojenlenmiş amorf karbon
UV-Visible	Morötesi-görünür bölge geçirgenlik
XPS	X-ışını foto-elektron spektroskopisi
SiH <sub>4</sub>	Silan
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etilen
FL	Fotoluminesans
RF	Radyo frekansı
DG	Düşük güç
YG	Yüksek güç
GaAsP	Galyum arsenid fosfat
a-SiN <sub>x</sub> :H	Hidrojenlenmiş amorf silisyum azot
a-SiGe <sub>x</sub> :H	Hidrojenlenmiş amorf silisyum germanyum
CH <sub>4</sub>	Metan
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Ksilen
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Asetilen
Kat-KBB	Katalitik kimyasal buhar biriktirme
EPMA	Elektron sondası mikro analizeri
AES	Auger elektron spektroskopisi
MTM	Çoklu enine mod
TEM	Enine (transverse) elektromanyetik mod
LED	Işık yayan diyot
JDOS	Birleşik durum yoğunluğu dağılımı
Ar	Argon
B	Lineer deformasyon potansiyeli
BE	Bağlanma enerjisi
ΔE <sub>L</sub>	Tam genişlik yarı maksimum enerjisi
E	Enerji
E <sub>04</sub>	Soğurma katsayısının 10 <sup>4</sup> cm <sup>-1</sup> olduğu durumdaki optik enerji
E <sub>Tauc</sub>	Tauc optik enerjisi

$E_U$	Urbach enerjisi
$E_F$	Fermi enerjisi
$E_{\text{Gap model}}$	Model optik enerji aralığı
$E_i$	Uyarılmış bir enerji seviyesi
$E_f$	Final enerji seviyesi
$E_g(q)$	Taban durumun enerjisi
$E_x(q)$	Uyarılmış durumun enerjisi
$E_c$	Uyarılmış durumun minimum enerjisi
$E_L$	Fotoluminesans maksimumun enerjisi
$E_S$	Stokes kayması
$E_A$	Soğurma bandı maksimum enerjisi
$E_{op}$	Optik enerji
$E_0$	Tipik fonon enerjisi
$E_{th}$	Termalizasyon enerjisi
$E_{DB}$	Değerlik bant kenarı enerjisi
$E_{iB}$	İletim bant kenarı enerjisi
$E_{DB0}$	Değerlik bant uzantı durum yoğunluğu dağılımının yaygınlığı ile ilişkili olan düzensizliği temsil eden parametre
$E_{iB0}$	İletim bant uzantı durum yoğunluğu dağılımının yaygınlığı ile ilişkili olan düzensizliği temsil eden parametre
He-Cd	Helyum-Kadmiyum
He-Ne	Helyum-Neon
$\hbar$	Planck sabiti
$I(\hbar\omega)$	Fotoluminesans yoğunluğu
$I_n$	X-ışını foto-elektron spektrumunda, elemente ait pikin alanı
$i$	Elektron ve deşığı belirten indis
KE	Kinetik enerji
Kr	Kripton
$k$	Boltzman sabiti
M	Gaz konsantrasyonu
$N_0$	Bant kenarındaki durum yoğunluğu
$N_{iB}(E)$	İletim bant uzantı durum yoğunluğu
$N_{DB}(E)$	Değerlik bant uzantı durum yoğunluğu
$N_{iB0}$	İletim bant kenarındaki durum yoğunluğu

$N_{DB0}$	Değerlik bant kenarındaki durum yoğunluğu
$P$	Işımalı birleşme olasılığı
$P_e$	Elektronların durum yoğunluğu dağılımı
$P_d$	Deşiklerin durum yoğunluğu dağılımı
$r_0$	Bohr yarıçapı
r.b.	Rasgele birim
$R_{0e}$	Elektron dalga fonksiyonunun yerleşme yarıçapı
$R_{0d}$	Deşik dalga fonksiyonunun yerleşme yarıçapı
$R$	Elektron ve deşik arasındaki mesafe
$R_C$	Kritik uzaklık
$S_n$	Hassasiyet faktörü
$T$	Sıcaklık
$\tau_0$	Elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının tamamen örtüşmesi durumunda geçen ömür süresi
$\omega_0$	Fonon frekansı
$x$	Karbon içeriği
Xe-He	Ksenon-Helyum
$\phi$	İş fonksiyonu
$\sigma$	Sigma bağı
$\pi$	Pi bağı

## ÖZET

### PLAZMA İLE BÜYÜTÜLMÜŞ HİDROJENLEMİŞ AMORF SİLİSYUM KARBÜR İNCE FİMLERİN FOTOLÜMİNESANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim GÜNEŞ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kıvanç SEL

06.01.2012, 72

Bu çalışmada,  $30 \text{ mW/cm}^2$  (Düşük güç (DG)) ve  $90 \text{ mW/cm}^2$  (Yüksek güç (YG)) olmak üzere iki farklı radyo frekansı (RF) güç yoğunluğunda ve dört farklı karbon içeriğinde (x), plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB) sistemi ile büyütülmüş olan hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ( $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ) ince filmlerin fotoluminesans spektrumları incelendi ve ışıma mekanizmaları analiz edildi.

Oda sıcaklığında ölçülen fotoluminesans spektrumlarına Gauss eğrileri uydurularak fotoluminesans maksimumları ( $E_L$ ) ve tam genişlik yarı maksimumları ( $\Delta E_L$ ) hesaplandı ve morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi ile belirlenmiş olan optik enerjiler ve Urbach enerjileri ile karşılaştırılarak analiz edildi. Filmlerin, X-ışını foto-elektron spektroskopisi ile belirlenmiş olan karbon içeriğinin artması sonucunda  $E_L$  ve optik enerjilerin orantılı olarak arttığı; bu artışın YG filmlerde DG filmlere kıyasla daha fazla olduğu gözlemlendi.  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmlerin ışıma mekanizmaları, ‘*elektron-fonon çiftleşmesi modeli*’ ve ‘*statik düzensizlik modeli*’ çerçevesinde araştırıldı. DG filmler için elektron-fonon çiftleşmesi modelinin ve YG filmler için ise statik düzensizlik modelinin baskın model olduğu belirlendi.  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmlerin oda sıcaklığındaki fotoluminesans spektrumları, empirik Gauss fonksiyonları ile tanımlanan iletim ve değerlik bant uzantı durum yoğunluklarının bileşke durum yoğunluğu yaklaşımı ile modellendi. Işıma modeli, ölçülen fotoluminesans spektrumlarına nümerik olarak uygulandı ve modelin deney verileri ile uyduğu görüldü.

**Anahtar Sözcükler:** Fotoluminesans, hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür, PDKBB, elektron-fonon çiftleşmesi modeli, statik düzensizlik modeli, bileşke durum yoğunluğu

## ABSTRACT

# INVESTIGATION OF PHOTOLUMINESCENCE PROPERTIES OF PLASMA DEPOSITED HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON CARBIDE THIN FILMS

İbrahim GÜNEŞ

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Science and Engineering

Chair for Physics Thesis of Master of Science

Advisor: Assist. Prof. Dr. Kivanç SEL

06.01.2012, 72

In this work, photoluminescence spectra of hydrogenated amorphous silicon carbide ( $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ) thin films, which were deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition technique (PECVD), with various carbon contents ( $x$ ) and at two different radio frequency power densities of  $30 \text{ mW/cm}^2$  (Low power (LP)) and  $90 \text{ mW/cm}^2$  (High power (HP)), were investigated and the luminescence mechanisms were analyzed.

The photoluminescence peak energies ( $E_L$ ) and full width half maxima ( $\Delta E_L$ ) were calculated by fitting Gaussian curves to the measured room temperature photoluminescence spectra and analyzed by comparing with the optical energies and Urbach energies ( $E_U$ ), which were determined by ultraviolet-visible transmittance spectroscopy. It was observed that  $E_L$  and optical energies were proportionally increase by increasing carbon content of the films, which were determined by x-ray photoelectron spectroscopy measurements. Moreover, this increase were higher in HP films with respect to LP films. The luminescence mechanisms of the  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  films, were investigated within the frame of ‘*the electron-phonon coupling model*’ and ‘*the static disorder model*’. It was determined that, for LP films the dominant mechanism is the electron-phonon coupling model, whereas for HP films, it is the static disorder model. The Room temperature photoluminescence spectra of  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  films were modeled by joint density of tail states approach, where the density of states of the conduction and valence band tails were introduced by empirical Gaussian functions. This model was applied numerically to the room temperature photoluminescence spectra of  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  films and it was

observed that the model closely overlaps with the obtained experimental data of photoluminescence.

**Keywords:** Photoluminescence, hydrogenated amorphous silicon carbide, PECVD, electron-phonon coupling model, static disorder model, joint density of tail states

# İÇERİK

	<b>Sayfa</b>
TEZ SINAVI SONUÇ FORMU .....	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI .....	iii
TEŞEKKÜR .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	v
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
<b>BÖLÜM 1- GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Giriş .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Kristal ve Amorf Yarıiletkenlerin Özellikleri .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür Filmlerin Özellikleri .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür Filmlerin Fotolüminesans         Özellikleri .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1. Elektron-Fonon Çiftleşmesi Modeli .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4.2. Statik Düzensizlik Modeli .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.3. Birleşik Durum Yoğunluğu Dağılımı Fotolüminesans Modeli ....</b>	<b>16</b>
<b>1.5. Amaç .....</b>	<b>17</b>
<b>BÖLÜM 2- ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Giriş .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür ve Fotolüminesans ile İlgili         Önceki Çalışmalar .....</b>	<b>18</b>
<b>BÖLÜM 3- MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi ve a-SiC<sub>x</sub>:H         İnce Filmlerin Büyütülmesi .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopi Sistemi .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopi Sistemi .....</b>	<b>29</b>

	<b>Sayfa</b>
<b>3.4. Fotolüminesans Spektroskopi Sistemi .....</b>	<b>30</b>
<b>3.4.1. Optik Masa .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4.2. Uyarıcı Işık Kaynağı .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4.3. Optik Darbeleyici .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.4. Optik Bileşenler .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.5. Kriyostat ve Sıcaklık Kontrol Cihazı .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4.6. Monokromatör .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.7. Foto-çoklayıcı .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4.8. Kilitlemeli Yükselteç .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.9. Bilgisayar .....</b>	<b>40</b>
<b>BÖLÜM 4 - ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. Giriş .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Ölçüm ve     Analizleri .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4. Fotolüminesans Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri .....</b>	<b>45</b>
<b>BÖLÜM 5 - SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>68</b>
<b>Çizelgeler .....</b>	<b>I</b>
<b>Şekiller .....</b>	<b>II</b>
<b>Özgeçmiş .....</b>	<b>VII</b>



**BÖLÜM 1****GİRİŞ****1.1. Giriş**

Günümüzde modern elektronik teknolojisi bilgi işleme, iletişim, medya, sanayi... gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilgi depolama, işleme ve görüntüleme, görüntülü ve sesli iletişim, çeşitli detektörler, kontrol mekanizmaları, enerji depolama ve dönüştürme... gibi çok farklı işlevleri yerine getirebilen elektronik aygıtların verimli kullanımına imkan sağlayacak boyutlarda üretilmesinde ve geliştirilmesinde yarıiletkenler çok önemli bir yere sahiptir. Birçok işlevi yerine getirebilen elektronik aygıtların boyutlarının küçültülmesi kullanım alanlarının artmasında etkili olmuştur. Ancak bu cihazların minyatürleşmesinin yanında, monitör, klavye... gibi kullanıcı arayüzlerinin insan duyu ve kullanımına uygun boyutlarda ve hatta birçok insanın aynı anda kullanmasına imkan sağlayacak büyüklükte olmaları gerekmektedir. Bu sebeple günümüzde ince, geniş alanlı ve hatta devasa boyutlarda sinyalizasyon ve görüntüleme aygıtlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür görüntüleme ve sinyalizasyon aygıtlarında kullanılan en son teknolojilerden biri elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde ışıyan diyotlardan (LED) oluşan monitörlerdir. Bu teknolojinin geliştirilmesi için LED'leri oluşturacak özelliklere sahip yeni materyallerin üretilmesi, özelliklerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Yarıiletkenlerden silisyum; p- ve n- türü katkılanabilmesi, kendi oksidinin olması, doğada bol miktarda bulunması ve karbon, oksijen, azot, bor, fosfor... gibi çeşitli elementlerle bileşikler oluşturabilmesi özellikleri bakımından modern elektronikte yaygın olarak kullanılan ve araştırılan bir elementtir. Silisyum karbür, silisyumun alaşımlardan birisidir. Sürtünmeye, yüksek sıcaklığa, paslanmaya ve yüksek radyasyona dayanıklı bir madde olması sebebi ile çok uzun zamandır izolasyon ve ısıtma sistemlerinde seramik malzeme olarak kullanılmıştır. Son yıllarda silisyum karbür; kristal ve amorf yapıda geniş alanlı cam gibi sıradan alttaşlar üzerine ince film olarak büyütülebilmesi, p- ve n- türü katkılanabilmesi, yapısal, elektrik ve optik özelliklerinin ayarlanabilmesi ve en önemlisi yasak enerji aralığının elektromanyetik spektrumun görünür bölge enerjilerini kapsayacak şekilde ayarlanabilmesi dolayısı ile görünür bölgede ışıyan LED'ler için yapılan araştırmalarda önemli yarıiletken malzemelerden biri olmuştur (Hamakawa ve ark., 1989; Kanicki, 1991; Street 1991).

Bu çalışma kapsamında hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ( $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ) ince filmlerin fotoluminesans özellikleri araştırılmış, ışınım mekanizmaları ve özellikleri belirlenmiştir.  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmler, silan ( $\text{SiH}_4$ ) ve etilen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) kaynak gazları kullanılarak radyo frekansı (RF) plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB) sistemi ile  $30 \text{ mW/cm}^2$  (Düşük güç (DG)) ve  $90 \text{ mW/cm}^2$  (Yüksek güç (YG)) olmak üzere iki farklı RF güç yoğunluğunda ve her bir güç yoğunluğu için dört farklı karbon içeriğinde (x) bu çalışmadan önce büyütülmüştür (Sel, 2007).

Tezin giriş bölümünde, önce kristal ve amorf katıların özellikleri ve sonrasında  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmlerin yapısal, elektronik ve optik özellikleri incelenmiştir. Literatürde kabul görmüş ışınım mekanizmalarından Street tarafından önerilmiş olan ‘elektron-fonon çiftleşmesi modeli’ ve Boulitrop ve Dunstan tarafından önerilmiş olan ‘statik düzensizlik modeli’ açıklanmıştır (Street, 1991; Boulitrop ve Dunstan, 1983; Dunstan ve Boulitrop, 1984). Son olarak, enerji bant aralığındaki iletim ve değerlik bant uzantılarının durum yoğunlukları empirik Gauss fonksiyonları ile tanımlanmış, oda sıcaklığındaki fotoluminesans spektrumu bu durum yoğunluklarının bileşkesinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir.

Önceki çalışmalar bölümünde,  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmler başta olmak üzere hidrojenlenmiş amorf silisyum ( $a\text{-Si:H}$ ) ve silisyumun bazı diğer alaşımlarının fotoluminesans özellikleri ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünde, filmlerin büyütüldüğü PDKBB sistemi, filmlerin karbon içeriklerinin analiz edildiği X-ışını foto-elektron spektroskopisi (XPS) sistemi, kalınlık ve optik enerjilerinin analiz edildiği morötesi-görünür bölge geçirgenlik (UV-Visible) spektroskopisi sistemi ve fotoluminesans spektroskopisi sistemi tanıtılmıştır.

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde,  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmlerin büyütülme parametreleri rapor edilmiştir. Bu çalışmadan önce yapılmış olan XPS analizleri sonucunda bulunmuş karbon içerikleri; UV-Visible analizleri sonucunda hesaplanmış film kalınlıkları, optik ve Urbach enerjileri rapor edilmiştir (Akaoglu, 2004; Sel, 2007; Akaoglu ve ark., 2008). Sonrasında, bu çalışmanın ana konusu olan fotoluminesans spektrumları ölçülmüş, grafikleri enerjinin fonksiyonu olarak çizdirilmiş ve oda sıcaklığı spektrumlarına Gauss fonksiyonları uydurulmuştur. Gauss eğrilerinin maksimumları ve tam genişlik yarı maksimumları belirlenmiştir. Fotoluminesans spektrumunun maksimumu ve tam genişlik yarı maksimumu, optik ve Urbach enerjileri filmlerin karbon içeriklerine ve RF güç yoğunluklarına bağlılıkları bakımından incelenmiş ve bu veriler ile ışınım mekanizmalarından elektron-fonon çiftleşmesi modeli ve statik düzensizlik modellerinden

hangisinin baskın ışınım mekanizması olduğu analiz edilmiştir. Son olarak; elde edilen veriler, birleşik durum yoğunluğu kullanılarak önerilen oda sıcaklığı ışınım modeline uygulanmıştır.

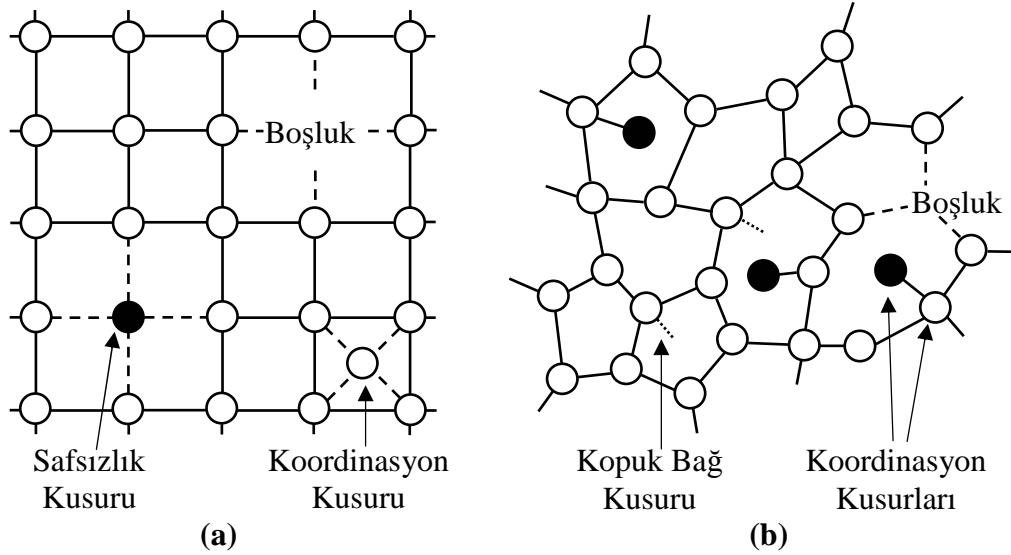
Son bölüm olan sonuçlar ve öneriler bölümünde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. DG a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerde elektron-fonon çiftleşmesi modelinin, YG filmlerde ise statik düzensizlik modelinin baskın model olduğu, bununla beraber her iki modelin de beraber olarak ışınım mekanizmasına katkı yaptığı gözlemlenmiştir. Önerilen teorik ışınım modelinin deneysel veriler ile çok iyi uyduğu ve teorik modelin oda sıcaklığı ışınım mekanizmasını başarı ile açıkladığı sonucuna ulaşılmıştır.

### **1.2. Kristal ve Amorf Yarıiletkenlerin Özellikleri**

Kristalleri oluşturan atomlar tüm yapı boyunca periyodik bir düzene sahiptir. Kristaller genel olarak tek kristal ve polikristal olmak üzere ikiye ayrılır. Tek kristalde atomlar tüm kristal boyunca düzenli sıralanırken, polikristalde düzenli sıralanış tüm yapı içinde tane sınırları diye adlandırılan sınırlarla çevrili daha küçük bölgelerde görülebilir. 14 farklı kristal örgü çeşidi bulunur ve bunlara Bravais örgüleri denir. İdeal kristal yapılar kusursuz olarak tanımlansalar da gerçek kristal yapılar mükemmel değildir ve çeşitli kusurlara sahiptirler (Şekil 1.1a). Kristal örgü yapısında olması gereken atomun yerini başka bir atom işgal edebilir, bu tür kusurlara ‘yer değişen atom ya da safsızlık kusuru’ denir. Bir ya da daha fazla atomun yeri boş kalmışsa ‘boşluk kusuru’ veya atom olması gereken yerden başka yerde bulunuyorsa ‘koordinasyon kusuru’ olarak adlandırılır. Bu tür kusurlar sadece birkaç atomluk bir bölgede ise ‘nokta kusuru’; eğer kusurlu bölgenin büyüklüğü daha geniş ise ‘örgü kusuru’ olarak adlandırılır. Kristal yapıları yarıiletkenlerin enerji bant yapıları keskin sınırlara sahip iletim ve değerlik bantlarından oluşur. Bu iki bant arasında ise yasak enerji aralığı bulunur (Street, 1991).

Amorf yapı mikro-mertebelerde bir düzene sahip olabilese de genel olarak tamamen düzensizdir. Kristal yapı ile karşılaştırıldığında amorf yapıda kopuk bağlar, atomların düzensiz olarak birbirine bağlanmaları, bağların açı ve uzunluk bakımından koordinasyonunun düzensizliği gibi kusurlar çok fazladır (Şekil 1.1b). Bu durumda amorf yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı kusur durumları ile doldurulmuştur. Dolayısıyla, amorf yapı bu haliyle ışıyan elektronik bir aygıt yapmaya uygun özelliklere sahip değildir. Amorf yapının bu bakımdan uygun hale dönüşmesi için yasak enerji aralığındaki kusur durumlarının yoğunluğunun azaltılması gereklidir. Hidrojenlenme sonucunda, yasak enerji aralığındaki ‘derin durum’ diye de adlandırılan kopuk bağların durum yoğunluğu başta

olmak üzere kusur durumlarının yoğunluğu büyük oranda azaltılabilir. Hidrojenlenmiş bir amorf yapının yasak enerji aralığında, Fermi enerjisi seviyesinde kopuk bağlardan kaynaklanan derin durumlar ve iletim ve değerlik bantları kenarlarında ise yerleşmiş bant uzantı durumları bulunur (Street, 1991).



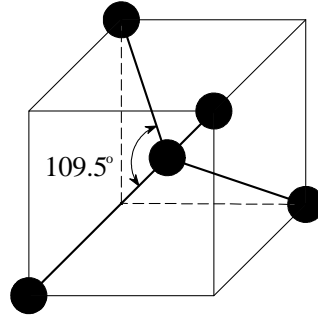
Şekil 1.1. a) Kristal ve b) amorf yapıların ve bu yapıdaki temel kusurların şematik gösterimi.

### 1.3. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür Filmlerin Özellikleri

a-SiC<sub>x</sub>:H filmler; silisyum, karbon ve hidrojen atomlarından oluşur. Yapıdaki karbon içeriği 'x' ( $0 \leq x \leq 1$ ) ile belirtilir. x=0 durumunda yapı hidrojenlenmiş amorf silisyumdur (a-Si:H). x=0.5 olduğunda, yapıdaki silisyum ve karbon içeriği birbirine eşit olur. x=1 durumunda ise yapı hidrojenlenmiş amorf karbondur (a-C:H). Dolayısıyla, a-Si:H karakteristiğinin baskın olduğu x<0.5 bölgesine silisyum zengin; a-C:H karakteristiğinin baskın olduğu x>0.5 bölgesine ise karbon zengin a-SiC<sub>x</sub>:H film denilebilir (Robertson, 1986, 1987, 1991, 1992 a,b). a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin özelliklerinin anlaşılabilmesi için a-Si:H ve a-C:H filmlerin özelliklerinin incelenmesi faydalı olacaktır.

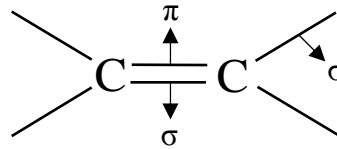
a-Si:H filmlerini oluşturan silisyum ( $3s^23p^2$ ), tetrahedral geometride birbirleri arasında  $109.5^\circ$  açı olan dört bağ yapabilmektedir (Şekil 1.2). Kristal silisyumun enerji bant aralığı 1.1 eV iken, a-Si:H'un enerji bant aralığı 1.75 eV civarındadır. Değerlik bandı p-durumu ve s-durumundan oluşur; p-durumları daha yüksek enerjileri kapsar. İletim bandının düşük enerjili kenarı ise s-durumlarından oluşur. Si-H bağı, Si-Si bağından daha

kuvvetlidir ve yapıdaki hidrojen konsantrasyonu arttıkça değerlik bandı daha yüksek enerjiye doğru kayar. İletim bandı ise bu artıştan daha az etkilenir. Sonuç olarak hidrojenleme ile bant aralığı artar. İletim ve değerlik bantlarını, bant kenarlarından itibaren bant uzantı durumları takip eder. s-durumları küresel simetrik olduklarından bağ açısı düzensizliği gibi koordinasyon kusurlarından daha az etkilenir. Bu sebeple p-durumlarından oluşan değerlik bandı uzantı durumları, s-durumlarından oluşan iletim bandı uzantıları durumlarına kıyasla daha yaygındır. Enerji bant aralığında, Fermi enerjisi seviyesinde ise derin durumlar bulunur (Street, 1991).



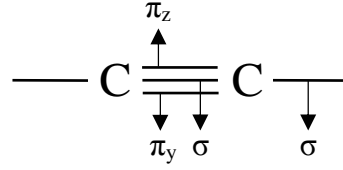
Şekil 1.2. Tetrahedral yapı.

a-C:H filmlerde; karbon  $sp^1$ ,  $sp^2$  ve  $sp^3$  hibritleşmeleri ile sırasıyla doğrusal (Olefinik yapı), grafitik (Aromatik yapı) ve tetrahedral geometrilerde yapılar oluşturabilmektedir. Grafitik yapıda karbon atomları, düzlemsel olarak ve aralarında  $120^\circ$ lik açı olan üç atomla bağ yaparlar. Bu bağlardan ikisi  $\sigma$  türüdür. Diğeri ise bir  $\sigma$  ve bir  $\pi$  türü bağdan oluşur (Şekil 1.3). Bu atomlar birleşerek bal peteğine benzeyen altıgen halkalı yapıları oluştururlar.



Şekil 1.3.  $sp^2$  türü hibritleşmiş karbon atomlarının yapısı (Grafitik yapı).

Olefinik yapıda karbon atomları doğrusal olarak iki atoma bağlanırlar. Bağların biri  $\sigma$  türüdür. Diğeri ise bir  $\sigma$  ve iki tane  $\pi$  türü bağdan oluşur (Şekil 1.4).

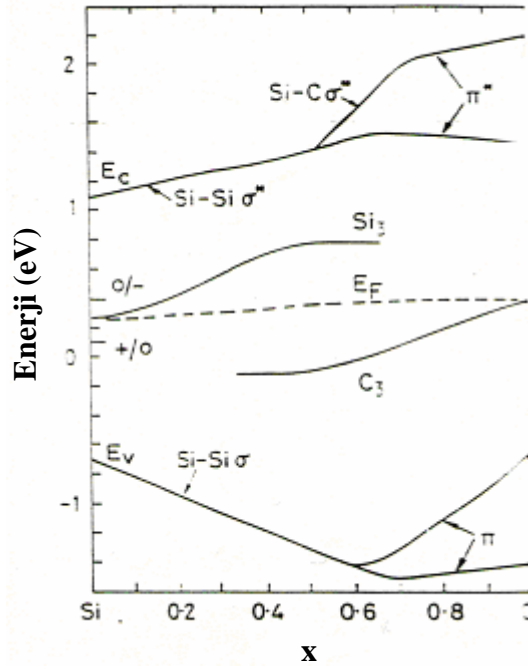


Şekil 1.4.  $sp^1$  türü hibritleşmiş karbon atomlarının yapısı (Olefinik yapı).

a-C:H filmlerin enerji bant aralığı grafitin 0 eV iken, elmasın 5.5 eV'tur. a-C:H'un enerji bant aralığı ise yaklaşık 3 eV'tur. a-C:H'un enerji bant yapısında bant uzantı durumlarına  $\pi$  türü bağların oluşturduğu durumlar da katkı yapar. Grafitik yapı oluşumu arttıkça  $\pi$  türü bağların oluşturduğu bu tür durumların yoğunluğu artar ve enerji bant aralığının daralmasına sebep olur.

Silisyum zengin a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerde a-Si:H'un özellikleri baskındır. Karbon içeriği arttıkça Si-Si bağlarının yerini daha güçlü olan Si-C ve C-C bağları alır ve tetrahedral yapıya ek olarak grafitik ve olefinik yapılar da oluşmaya başlar. Grafitik yapılar önce küçük adacıklar şeklinde oluşur ve sonrasında artan karbon içeriğine bağlı olarak adacıkların boyutları genişler.

a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin enerji bant yapısının özellikleri, yapısal özelliklerine benzer şekilde karbon içeriğine bağlı olarak a-Si:H'un enerji bant yapısından, a-C:H'un enerji bant yapısına doğru değişir.  $x \approx 0.5$  civarında her ikisinin bir kombinasyonu oluşur. Dolayısıyla enerji bant aralığı 1.75 eV'tan 3 eV'a kadar ayarlanabilir. Karbonun yapıya dahil olması sonucunda artan  $\sigma$  türü Si-C bağları ile enerji bant aralığı genişler. Karbon zengin bölgeye yaklaştıkça, karbonun grafitik ve olefinik yapıları oluşturması sebebi ile ortaya çıkan  $\pi$  türü bağların sonucunda bant uzantı durum yoğunluklarında artma gözlemlenir. Bu artma karbon zengin bölgede bant aralığının genişlemesine ters bir trend oluşturur. Fermi enerjisinin etrafında silisyum (Si<sub>3</sub>) ve karbon (C<sub>3</sub>) kopuk bağlarının oluşturduğu derin durumların yoğunluğu da yapıdaki düzensizliğin artmasına bağlı olarak artar (Şekil 1.5) (Robertson, 1986, 1987, 1991, 1992 a,b).



Şekil 1.5. a-SiC<sub>x</sub>:H’de bant uzantılarının değişimi ve kusur seviyeleri (Robertson, 1992 a).

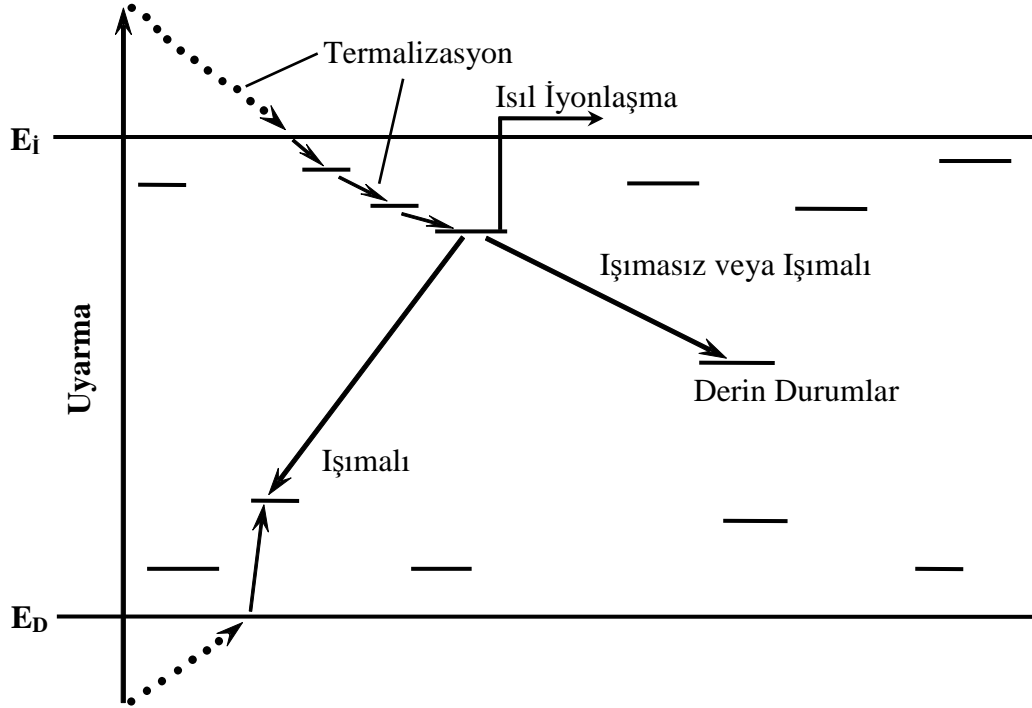
#### 1.4. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür Filmlerin Fotolüminesans Özellikleri

Lüminesans, optik radyasyonun atomik enerji seviyelerinin uyarılması yolu ile oluşmasıdır. Lüminesans, gelen ışığın madde tarafından soğurulması ile uyarılan yük taşıyıcılarının yeniden birleşmesi sonucunda gerçekleşiyor ise bu tür lüminesansa ‘fotolüminesans’ denir. Yeniden birleşme, ışımalı veya ışısız olarak gerçekleşebilir. Işımalı yeniden birleşme sonucunda foton, ışısız yeniden birleşmede ise fonon yayılır. Fotolüminesans spektrumu, enerji bant yapısı ve buna bağlı olan ışımalı yeniden birleşme mekanizmaları ile ilgili önemli ve direkt bilgiler sağlar. Bunun yanında ışısız birleşme hakkında da fikir edinilmesine olanak verir (Yu ve Cardona, 1995; Street, 1991).

Fotolüminesans, yük taşıyıcıların uyarılması ile başlar. Uyarıcı ışığın enerjisi, maddenin enerji bant aralığından büyük olmalıdır. Uyarılan elektronlar iletim bandına geçiş yaparlar. Bu aşamadan sonra yeniden birleşme süreci başlar.

Yeniden birleşmenin ilk aşaması termalizasyon olarak adlandırılır. Termalizasyonda uyarılmış elektron ve deşikler, iletim ve değerlik bantlarının kenarlarına kadar birbirine yakın enerji seviyeleri arasında ardı ardına çok hızlı gerçekleşen geçişler yaparlar. Amorf malzemelerde bu geçişler bant kenarına ulaşıldıktan sonra yerleşmiş bant uzantı durumlarında da devam eder. Termalizasyon sonucunda fonon yayılır (Street, 1991).

Termalizasyon sürecinin ardından ışıklı ya da ışısız yeniden birleşme süreçleri gelir. Işıklı yeniden birleşme, genellikle elektron ve deşik'in iletim ve deşik bant uzantılarındaki yerleşmiş durumlar arasında birleşmeleri ile oluşur. Işıksız yeniden birleşme ise iletim bandı ve deşik bantı ile enerji bant aralığında bulunan derin durumlar arasında yapılan daha düşük enerjili geçişler sonucunda meydana gelir. Şekil 1.6'da ışıklı ve ışısız geçişler gösterilmiştir (Street 1991).



Şekil 1.6. Amorf silisyumda elektron-deşik çiftinin termalize olması ve yeniden birleşme mekanizmalarının şeması.

Amorf yarıiletkenlerde, iletim ve deşik bant uzantı durumları arasında uyarılmış bir enerji seviyesi ( $E_i$ ) ile daha düşük bir enerji seviyesi ( $E_f$ ) arasında,  $\hbar\omega$  enerjili bir fotonun yayılması ile sonuçlanan bir ışıklı birleşmenin olasılığı ( $P$ ), Fermi altın kuralı ile verilir (Street, 1991):

$$P = \frac{2\pi}{\hbar} |M|^2 \delta(E_i - E_f + \hbar\omega) \quad (1.1)$$

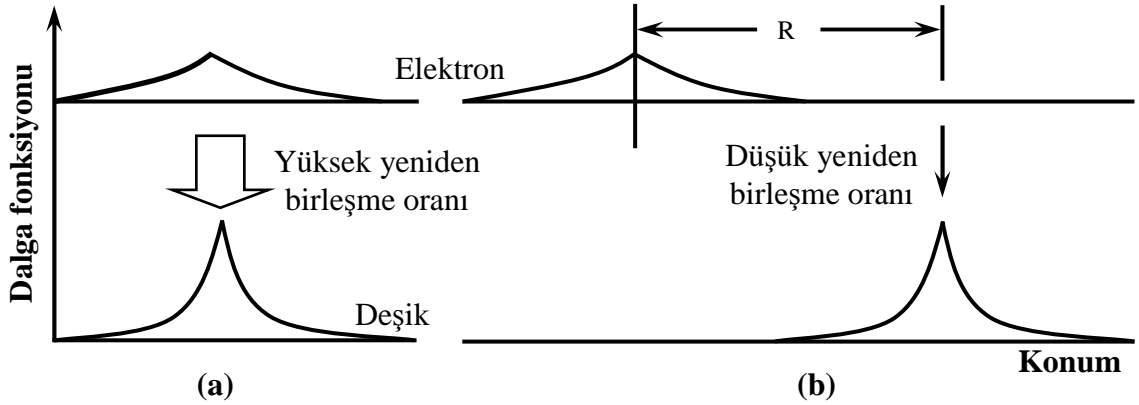
Burada ' $\delta(E_i - E_f + \hbar\omega)$ ' enerjinin korunumunu gösterir, 'M' geçiş matris elemanıdır.



$$M = M_0 J(\psi_e, \psi_d) \quad (1.2)$$

$$J \approx \int \exp\left(-\frac{r}{R_{0e}}\right) \exp\left(-\frac{R-r}{R_{0d}}\right) d^3 r \approx \exp\left(-\frac{R}{R_{0e}}\right) \quad (1.3)$$

'J' elektron ( $\psi_e$ ) ve deşiklerin ( $\psi_d$ ) dalga fonksiyonlarının örtüşme integralidir (Thomas ve ark., 1965).  $R_{0e}$  ve  $R_{0d}$  elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının yerleşme yarıçapıdır. 'R' elektron ve deşik arasındaki mesafedir ve 'r' ise yerleşmiş merkeze olan mesafedir. Işımalı yeniden birleşme oranının dalga fonksiyonlarına bağımlılığı, Şekil 1.7a'da bir eksiton için ya da biri yaygın durumda ve diğeri yerleşmiş durumda olan ve dolayısıyla tam örtüşen elektron ve deşik için, ve Şekil 1.7b'de ise birbirinden R mesafesi kadar uzak olan yerleşmiş elektron ve deşik için gösterilmiştir.  $r \gg R_{0e} > R_{0d}$  durumunda 'J' yaklaşık olarak tek bir eksponansiyel fonksiyon ile ifade edilebilir.



Şekil 1.7. Elektron-deşik çiftinin tamamen ya da kısmen örtüşen dalga fonksiyonlarının yeniden birleşme ile ilişkisinin gösterimi (Street, 1991).

Eşitlik 1.3'te verilen örtüşme integralinin karesi alınarak ışmalı yeniden birleşme geçiş olasılığı:

$$P_{ışmalı} = P_0 \exp\left(-\frac{2R}{R_{0e}}\right) \quad (1.4)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Bu eşitliğe göre elektron ve deşik yerleşmiş durumları arasındaki uzaklık arttığında, geçiş olasılığı azalacaktır.

a-SiC<sub>x</sub>:H gibi geniş enerji bant aralıklı materyallerde yük taşıyıcıların bant uzantı durumlarına doğru termalizasyon yapmaları ve daha derin bant uzantı durumlarından değerlik bandına ya da derin durumlara geçiş yaparak ışımalı veya ışısız olarak birleşmeleri olasıdır. Literatürde kabul gören fotoluminesans ışımaya mekanizmaları genel olarak iki farklı yaklaşım ile açıklanabilir. Bu yaklaşımlardan birincisi; Street tarafından önerilmiş olan ‘elektron-fonon çiftleşmesi modelidir’ (Street, 1991). İkinci yaklaşım ise; Boulitrop ve Dunstan tarafından önerilmiş olan ‘statik düzensizlik modelidir’ (Boulitrop ve Dunstan, 1983; Dunstan ve Boulitrop, 1984). Ayrıca bu iki ışımaya modeli aynı zamanda birlikte de fotoluminesans mekanizmasını oluşturabilmektedir.

#### 1.4.1. Elektron-Fonon Çiftleşmesi Modeli

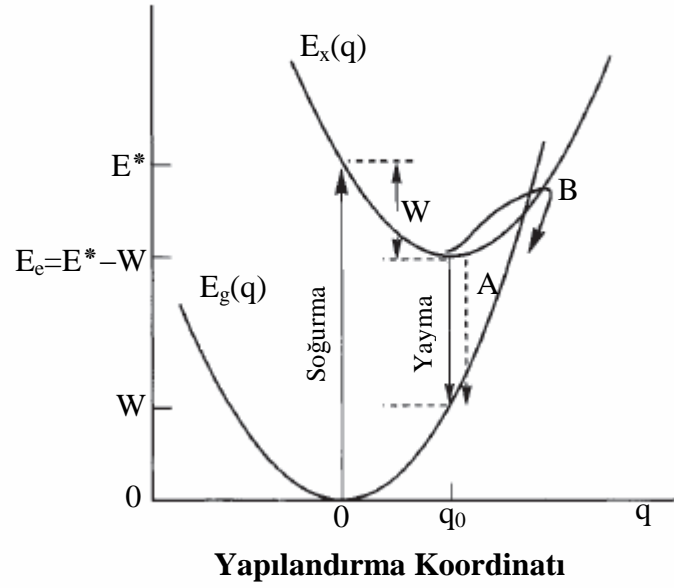
İşmalı yeniden birleşmede fononların etkisi büyükse fotoluminesans spektrumunu meydana getiren fotonların enerjisi, elektron-fonon etkileşimi hesaba katılarak düzenlenir. Bu amaçla elektron-fonon çiftleşmesi modelinde, ışmalı yeniden birleşme isminden de anlaşılacağı gibi elektron-fonon çiftleşmesi ile ilişkilendirilir. Eşitlik 1.1’de yeniden birleşme sonucunda tek bir fotonun yayımlanması ile enerjinin korunumu ifade edilmişti. Elektron-fonon etkileşiminde, yeniden birleşme sonucunda bir fotonun yayılmasına ek olarak birçok fononun oluşması da hesaba katılır.

Şekil 1.8’de gösterilen yapılandırma koordinatı (q) ve enerji gösterimi ile enerjinin korunumu ve elektron-fonon etkileşimi daha kolay anlaşılabilir. Taban ve uyarılmış enerji durumları, yapılandırma koordinatının fonksiyonu olarak tanımlanmıştır (Street, 1991):

$$\text{Taban durum} \quad : \quad E_g(q) = Aq^2 \quad (1.5)$$

$$\text{Uyarılmış durum} \quad : \quad E_x(q) = E^* + Aq^2 - Bq \quad (1.6)$$

Burada ‘B’, güçlü elektron-fonon etkileşmesini temsil eden lineer deformasyon potansiyelidir. Uyarılmış durumun minimum enerjisi  $E_e = E^* - W$ ’dir ve  $W = B^2 / 4A$ ’dir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Güçlü fonon çiftleşmesi ile bir malzemede soğurma ve yeniden birleşmeyi temsil eden yapılandırma koordinatı-enerjiyi ifade eden diyagram (A geçişi ışımali ve B geçişi ise fonon desteğiyle ışımayan geçişleri göstermektedir) (Street, 1991).

Bu mekanizmada iki durum arasındaki optik geçişler elektronik ve titreşim bileşenlerinin dalga fonksiyonlarının birbirinden ayrı olarak ele alındığı, adiyabatik yaklaşımla tanımlanır. Frank-Gordon ilkesine göre elektronların uyarılmaları sırasında atomların konumlarında bir değişim olmaz ve böylelikle elektronik geçişler sadece düşeyde olur (Şekil 1.8) (Fox, 2001). Bu durumda yayılan fotonun enerjisi

$$\hbar\omega = E_x(q) - E_g(q) = E^* - Bq \quad (1.7)$$

ile tanımlanır. Uyarılmış durumun minimum enerjisi:

$$\hbar\omega(q_0) = E^* - 2W = E_e - W \quad (1.8)$$

olarak gösterilebilir. Burada,

$$q = q_0 = B/2A \quad (1.9)$$

uyarılmış durumun minimumunun konumu olarak tanımlanır. Elektron-fonon çiftlenimi soğurma ve yayma spektrumunun genişlemesine sebep olur. Titreşimsel temel durum,  $\omega_0$  fonon frekanslı basit harmonik salıncının dalga fonksiyonuna sahiptir:

$$\psi(q) = sbt.\exp\left(-\frac{Aq^2}{\hbar\omega_0}\right) \quad (1.10)$$

İki seviye arasındaki geçişler için soğurma ve yayma olasılıkları titreşim dalga fonksiyonu ' $\psi(q - q_0)$ ' ile orantılıdır. Eşitlik 1.10'da verilen fonksiyon en düşük titreşim dalga fonksiyonudur, dolayısıyla düşük sıcaklıklardaki durum için ( $kT < \hbar\omega_0$ ) yayma spektrumunun ifadesi, eşitlik 1.7 ve eşitlik 1.10'a göre yeniden düzenlenir ise eşitlik 1.11'deki gibidir:

$$P_y(\hbar\omega) = sbt.\exp\left[-\frac{(\hbar\omega - E_e + W)^2}{\sigma^2}\right] \quad (1.11)$$

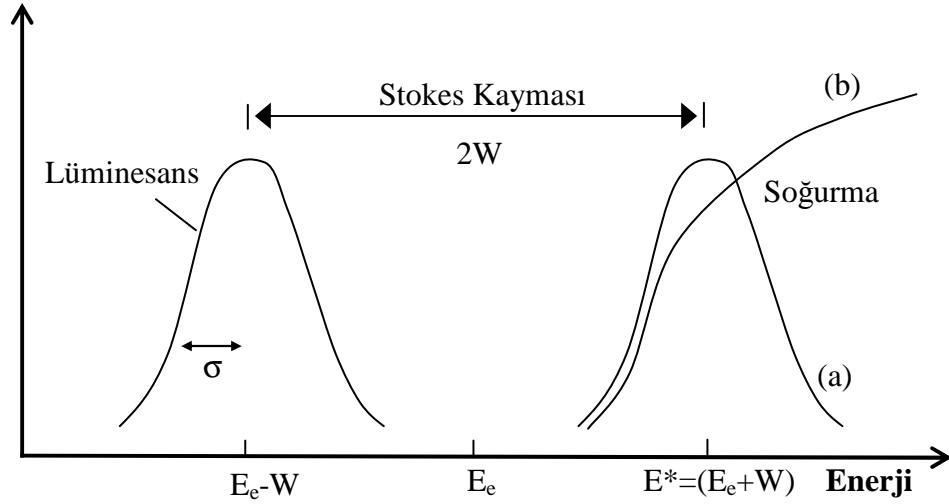
Burada,

$$\sigma = (2W\hbar\omega_0)^{1/2} \quad (1.12)$$

olarak kullanılmıştır. Soğurma spektrumunun eşdeğer ifadesi ise:

$$P_s(\hbar\omega) = sbt.\exp\left[-\frac{(\hbar\omega - E_e - W)^2}{\sigma^2}\right] \quad (1.13)$$

olarak gösterilir. Hesaplanan soğurma ve lüminesans bantları maksimumları arasındaki mesafe  $2W$  olmak üzere Gauss fonksiyonu biçimindedir (Şekil 1.9). Enerjiler arasındaki  $2W$ 'lik fark 'Stokes kayması' olarak adlandırılır. Elektron-fonon çiftlenimi kuvvetlendikçe, Stokes kayması ve eğrilerin genişliği ( $\sigma$ ) artar (Street, 1991).



Şekil 1.9. Uyarılma ile oluşan güçlü elektron-fonon çiftlenimi sonucunda soğurma ve yayma (lüminesans) spektrumları arasında meydana gelen enerji kayması (Stokes kayması). (a) kesikli (b) sürekli kısım (Street, 1991).

Deneysel olarak Stokes kaymasını belirlemek zordur. Uyarılma ve yeniden birleşme geçişlerinin banttandır ve bant uzantılarından termalizasyon sonucunda olması dolayısıyla soğurma ve yayma enerjileri süreklilik gösterir. Buna bağlı olarak birleşik durum yoğunluğu artar. Elektron-fonon çiftlenimi çok küçük bile olsa soğurma ile lüminesans spektrumlarının maksimumları arasında mutlaka bir enerji farkı olur (Street, 1991).

Street tarafından önerilen bu modelde, soğurma ve lüminesans bant enerjileri arasındaki fark ( $E_S = 2W$ ) ile fotolüminesans spektrumunun maksimumu ( $E_L$ ) arasındaki ilişki:

$$E_L = E_A - E_S \quad (1.14)$$

ile ifade edilebilir. Burada ' $E_A$ ' soğurma bandının maksimumunun enerjisidir (Searle ve Jackson, 1989). ' $E_A$ 'nın minimum değeri yaklaşık olarak optik enerji ( $E_{op}$ ) ile ifade edilebilir. Ek olarak  $E_L$  hesaplanırken termalizasyon sırasında harcanan enerji de hesaba katılmalıdır. Eşitlik 1.14 yeniden düzenlenir ise

$$E_L = E_{op} - E_S - E_{th} \quad (1.15)$$

olur. Fotoluminesans spektrumunun, elektron-fonon etkileşimi ile modellendiği elektron-fonon çiftleşmesi yaklaşımında, fotoluminesans spektrumunun tam genişlik yarı maksimumları ( $\Delta E_L^{e-fn}$ ) (Searle ve Jackson, 1989; Street, 1991; Tessler ve Solomon, 1995):

$$\Delta E_L^{e-fn} = 2[\ln(2)E_S E_0]^{1/2} \quad (1.16)$$

olarak hesaplanabilir. Burada, ' $E_0 = \hbar\omega_0$ ' tipik fonon enerjisidir ve ' $\omega_0$ ' fonon frekansdır ( $\approx 10^{12}$  Hz). a-Si:H için ' $E_0$ ' yaklaşık olarak 50-60 meV mertebesinde. Eşitlik 1.15'den  $E_S$ 'yi çekip eşitlik 1.16'da yerine yazarsak

$$\Delta E_L^{e-fn} = 2[\ln(2)(E_{op} - E_L - E_{th})E_0]^{1/2} \quad (1.17)$$

elde edilir.

#### 1.4.2. Statik Düzensizlik Modeli

Yeniden birleşme mekanizmasının belirlenmesindeki diğer model olan statik düzensizlik modelinde, fotoluminesans spektrumunun oluşumu, bant uzantı durumları ile ilişkilendirilir. Elektron ve deşiklerin, termalizasyon süresince bant uzantı durumları arasındaki tünelleme hızları (Boulitrop ve Dunstan, 1983)

$$\tau_t \approx \omega_0^{-1} \exp\left(\frac{2r}{r_0}\right) \quad (1.18)$$

ile ifade edilir. Burada ' $r$ ' geçiş yapılan iki enerji durumu arasındaki mesafe, ' $r_0$ ' bant uzantı durumunun Bohr yarıçapıdır ( $r_0 \approx 10^{-12}$  Å) (Tsang ve Street, 1979). Işımalı yeniden birleşme için ömür süresi ( $\tau_{ışmalı}^{-1}$ ) ise benzer şekilde:

$$\tau_{ışmalı} \approx \tau_0 \exp\left(\frac{2r}{r_0}\right) \quad (1.19)$$

olarak ifade edilir. Burada ' $\tau_0$ ' elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının tamamen örtüşmesi durumunda geçen ömür süresidir ve yaklaşık  $10^{-8}$  s'dir (Tsang ve Street, 1979).

Termalizasyon sırasında elektron ve deşiklerin bant uzantı durumlarının derinliklerine doğru ilerlemesi sonucunda, termalizasyon hızlarında azalma meydana gelir. Bu sayede tünelleme hızları ( $\tau_t^{-1}$ ) ve ışımali yeniden birleşme ömür süreleri ( $\tau_{ışımali}^{-1}$ ) birbirlerine yakın değerlere ulaşırlar. Bunların birbirine eşit olduğu kritik uzaklık  $r=R_C$  olarak tanımlanabilir (Boulitrop ve Dunstan, 1983, Street, 1981):

$$R_C = \frac{r_0}{2} \ln(v_0 \tau_0) \quad (1.20)$$

Bu aşamada birbirinden  $R_C$  kadar uzak olan elektron ve deşik çiftleri ışımali yeniden birleşme gerçekleştirirler (Boulitrop ve Dunstan, 1983).

Bant uzantı durumlarının uzayda rastlantısal olarak dağıldığı ve enerji ( $E_0$ 'ın logaritmik eğimi) ile exponansiyel olarak değiştiği kabul edilir ve  $R_C$  de sabit alınırsa bu durumların yoğunluğu

$$P_i(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \exp\left(-\frac{4}{3} \pi R_C^3 N_0^i E_0^i \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)\right) \quad (1.21)$$

ile ifade edilir (Boulitrop ve Dunstan, 1983; Dunstan ve Boulitrop, 1984; Giorgis ve ark., 2000). Burada 'i' indisi elektron ya da deşiği belirten indis, ' $N_0$ ' bant kenarlarındaki durum yoğunluk dağılımı ve 'E' mobilite kenarından ölçülen enerjidir. Fotoluminesans spektrumu  $P_e$  ve  $P_d$  eğrilerine bağlıdır (Giorgis ve ark., 2000). Değerlik bant uzantısının iletim bant uzantısından büyük olması nedeni ile fotoluminesans spektrumunun tam genişlik yarı maksimumu:

$$\Delta E_L = \gamma E_U \quad (1.22)$$

olarak yazılabilir. Burada ' $\gamma=2.45$ ' olarak hesaplanmıştır ve  $R_C$ 'den bağımsız bir sabittir. ' $E_U$ ' ise Urbach enerjisidir.

Elektron-fonon çiftleşmesi modeli ve statik düzensizlik modeli birbirlerinden bağımsız olarak ışımali mekanizmasını açıklamalarının yanı sıra aynı anda beraber işleyen mekanizmalar olarak da düşünülebilirler. Bu duruma uygun olarak ışımali mekanizmasına farklı oranlarda katkı yapabilirler. Fotoluminesans spektrumunun şeklinin belirlenmesinde

statik düzensizlik mekanizması baskın olduğunda, fotolüminesans spektrumunun tam genişlik yarı maksimumu

$$(\Delta E_L)^2 = (2.45E_u)^2 + (\Delta E_L^{e-fn})^2 \quad (1.23)$$

ile ifade edilir (Boulitrop ve Dunstan, 1983; Dunstan ve Boulitrop, 1984; Searle ve Jackson, 1989). Benzer şekilde, elektron-fonon çiftleşmesi modeli baskın olduğunda ise (Street, 1991):

$$(\Delta E_L)^2 = 4 \ln 2 (E_{op} - E_L - E_{th}) E_0 + (\Delta E_L^{stat})^2 \quad (1.24)$$

ile ifade edilir.

### 1.4.3. Birleşik Durum Yoğunluğu Dağılımı Fotolüminesans Modeli

a-SiC<sub>x</sub>:H filmler gibi geniş enerji bant aralıklı ve bant uzantı durum yoğunlukları yaygın ve fazla olan yarıiletken malzemeler için fotolüminesans spektrumlarının sadece elektron-fonon çiftleşmesi ya da statik düzensizlik modeli ile tam olarak açıklanması mümkün olmamaktadır. Bu durumda genelde bu iki modelin değişik oranlardaki bileşkesi, ışıma mekanizmasını temsil etmektedir. Bu çalışmada, ‘oda sıcaklığındaki’ ışıma mekanizmasını tek bir modelle açıklamak üzere, enerji bant aralığındaki iletim ve değerlik bant uzantılarının durum yoğunlukları empirik Gaussiyen fonksiyonları ile tanımlanmış ve oda sıcaklığındaki ışıma yoğunluğu bu durum dağılımlarının bileşkesinin (JDOS) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir.

İletim ( $N_{IB}(E)$ ) ve değerlik ( $N_{DB}(E)$ ) bant uzantı durum yoğunlukları, değerlik bant kenarının enerjisi ( $E_{DB}$ ) 0 eV ve iletim bant kenarının enerjisi ( $0 < E_{IB}$ ) pozitif olmak üzere

$$N_{IB}(E) = N_{IB0} \exp(-(E - E_{IB})^2 / 2E_{IB0}^2) \quad (1.25)$$

$$N_{DB}(E) = N_{DB0} \exp(-E^2 / 2E_{DB0}^2) \quad (1.26)$$



şeklinde tanımlanmıştır. Burada,  $N_{IB0}$  ve  $N_{DB0}$  sırasıyla iletim ve değerlik bant kenarındaki durum yoğunluğudur;  $E_{IB0}$  ve  $E_{DB0}$ , iletim ve değerlik bant uzantı durumları yoğunluklarının dağılımının yaygınlığı ile ilişkili olan düzensizliği temsil eden parametrelerdir.

Fotoluminesans yoğunluğunun ( $I(\hbar\omega)$ ) bir ölçüsü olarak JDOS fonksiyonu  $N_{IB}(E)$  ve  $N_{DB}(E)$ 'nin çarpımının integrali ile

$$I(\hbar\omega) \propto \int_{E_{DB}}^{E_{IB}-\hbar\omega} N_{IB}(E+\hbar\omega)F(E+\hbar\omega)N_{DB}(E)[1-F(E)]dE \quad (1.27)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada,  $\hbar\omega$  uyarıcı ışığın enerjisidir. Enerji durumlarının işgal durumlarını hesaba katmak için Fermi dağılım fonksiyonu, dolu durumlar için ( $F(E)$ ) ve boş durumlar için ( $1-F(E)$ ) olmak üzere integrale katılmıştır (Orapunt ve O'Leary, 2008).

### 1.5. Amaç

a-SiC<sub>x</sub>:H'ün özelliklerinin karakterizasyonunun yapılması ve özelliklerinin geliştirilebilmesi için optik özelliklerinin analiz edilmesi önemlidir. Bu tez kapsamında, önceden PDKBB sistemi ile büyütülmüş olan a-SiC<sub>x</sub>:H ince filmlerin fotoluminesans spektrumu ölçüm ve analizleri yapılacak ve ışıma mekanizmaları araştırılacaktır.

Filmlerin karbon içeriğini belirlemek için X-ışını foto-elektron spektroskopisi; filmlerin optik enerjilerini ve kalınlıklarını belirlemek için morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi kullanılacaktır. Daha sonra, ölçülen fotoluminesans spektrumları detaylı bir şekilde incelenecek, literatürde kabul görmüş 'elektron-fonon çiftleşmesi' ve 'statik düzensizlik' modelleri ışığında ışıma mekanizmaları belirlenecektir. Son olarak da, bileşke durum yoğunluğu kullanılarak önerilen alternatif ışıma mekanizması modeli ile deneysel veriler analiz edilecek ve bu model test edilecektir. Sonuç olarak; a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans spektrumuna karbon içeriğinin ve RF güç yoğunluğunun etkileri belirlenecektir.

## BÖLÜM 2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ( $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ) ince filmlerin fotoluminesans özellikleri ve ışımaya mekanizmaları araştırılmıştır. Bu konuda literatürdeki çalışmalar tez kapsamında incelenmiştir ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde faydalanılmıştır. Literatürdeki bu çalışmaların önemli bir kısmı bu bölümde özetlenmiştir.

### 2.2. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür ve Fotoluminesans ile İlgili Önceki Çalışmalar

Tessler ve Solomon (1995) tarafından yapılan çalışmada  $a\text{-SiC}_x\text{:H}$  filmler cam alttaşlar üzerine silan ( $\text{SiH}_4$ ) ve metan ( $\text{CH}_4$ ) kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür.  $0.06 \text{ W/cm}^2$  güç yoğunluğunda, gaz konsantrasyonları ( $M=\text{CH}_4/(\text{CH}_4+\text{SiH}_4)$ ) 0 ile 0.995 aralığında uygulanmıştır. Alttaş sıcaklığı  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ve reaktör basıncı da yaklaşık  $40 \text{ mTorr}$ 'a ayarlanmıştır. Bu çalışmada, büyütülen filmlerin fotoluminesans spektrumu ve ışımaya mekanizmaları araştırılmıştır. Çift ışınlı spektrofotometre yardımı ile filmlerin kalınlığı ( $d=0.93\text{-}1.29 \text{ }\mu\text{m}$ ), kırılma indisi ( $n_0=3.32\text{-}1.76$ ) ve soğurma katsayısı ( $\alpha(h\nu)$ ) hesaplanmıştır. Ardından karbon içerikleri ( $x$ )  $0 \leq x \leq 0.4$  aralığında tespit edilmiştir. Soğurma katsayısının  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  olduğu enerjiye karşılık gelen optik enerji ( $E_{04}$ ) ise  $1.93 \text{ eV}$  ile  $3.56 \text{ eV}$  aralığında bulunmuştur. Karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak bant uzantı durumlarının yaygınlığının bir ölçümü olan Urbach enerjisi ( $E_U$ )  $0.06 \text{ eV}$  ile  $0.362 \text{ eV}$  aralığında bulunmuştur. Fotoluminesans spektrumları  $77 \text{ K}$  ve oda sıcaklığında, uyarıcı ışık kaynağı olarak kripton ( $\text{Kr}^+$ ) lazeri kullanılarak (uyarılma enerjileri  $E_{04}$ 'e yakın;  $1.6\text{-}3.5 \text{ eV}$  aralığında) ölçülmüştür. Çeşitli karbon içerikleri ( $x=0, 0.1, 0.19, 0.24, 0.37, 0.4$ ) için  $77 \text{ K}$ 'de alınan fotoluminesans spektrumu incelenmiştir. Düşük karbon içeriklerinde ( $x<0.25$ ,  $E_{04}<2.7 \text{ eV}$ ,  $E_U<0.2$ ), düşük sıcaklıktaki fotoluminesans verimliliğinin karbon içeriğinin artması ile azaldığı, fotoluminesans maksimumlarının ( $E_L$ ) daha yüksek enerjilere kaydığı ve tam genişlik yarı maksimumlarının ( $\Delta E_L$ ) arttığı tespit edilmiştir. Yüksek karbon içeriklerinde ( $0.25<x<0.4$ ,  $2.8<E_{04}<3.5 \text{ eV}$ ,  $E_U>0.2$ ) ise, fotoluminesans verimliliğinin arttığı bildirilmiştir. Aynı zamanda bu filmlerde elektron ve deşimin güçlü Coulomb etkileşmesi ilişkisinden dolayı, ışımaya yeniden birleşme sürecinin çok hızlı gerçekleştiği ifade edilmiştir. Daha sonra fotoluminesans spektrumunun şeklinin belirlenmesinde, literatürde kabul görmüş olan

modeller ışığında fotolüminesans ışınım mekanizmaları incelenmiştir. Fotolüminesans spektrumundan elde edilen veriler ışığında, elektron-fonon çiftleşmesi modelinin katkısını araştırmak için öncelikle  $(\Delta E_L)^2$  dik  $E_{04}-E_L$  grafiği çizilerek eğimden fonon enerjisi ( $E_0$ ) hesaplanmış olup,  $E_0=0.569\pm 0.170$  eV bulunmuştur. Tipik fonon enerjisinin 0.06 eV olduğu belirtilerek, hesaplanan fonon enerjisinin bu değerden yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuca bağlı olarak, bu filmler için elektron-fonon etkileşmesi modelinin fotolüminesans spektrumuna katkısının ihmal edilebileceği bildirilmiştir. Diğer yandan Stokes kaymasını ( $E_S$ ) hesaplamak için ise fonon enerjisinin 0.06 eV olduğu varsayılarak,  $E_S=0.010\pm 0.019$  eV elde edilmiş ve diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca termalizasyon enerjisi ( $E_{th}$ ) yaklaşık olarak 0.53 eV bulunmuştur. Statik düzensizlik modelinin fotolüminesans spektrum şeklinin belirlenmesine katkısını araştırmak için,  $\Delta E_L$  dik  $E_U$  grafiği çizilerek eğimden  $\Delta E_L/E_U=3.85\pm 0.30$  olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak düşük karbon içeriğindeki filmlerin, fotolüminesans spektrumu şeklinin belirlenmesine katkı sağlayan mekanizmanın sadece statik düzensizlik modeli olduğu sonucuna varılmış olup, elektron-fonon çiftleşmesi modeli katkısının ise ihmal edilebileceği bildirilmiştir.

Giorgis ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H ve hidrojenlenmiş amorf silisyum azot (a-SiN<sub>x</sub>:H) filmler silisyum, cam ve kuvars gibi çeşitli alttaşlar üzerine sırasıyla SiH<sub>4</sub>+CH<sub>4</sub> ve SiH<sub>4</sub>+NH<sub>3</sub> kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. 4 W'lık RF gücü uygulanmış olup, reaktör basıncı 0.8-0.9 bar olarak ayarlanmıştır. Alttaş sıcaklığı ise 200-310 °C aralığında tutulmuştur. Filmlerin kalınlıkları 0.5-5 µm aralığında tespit edilmiştir. Diğer yandan filmlerin element kompozisyonu ise Rutherford geri-saçılma spektroskopisi ile yapılmış ve a-SiC<sub>x</sub>:H'nin karbon içerikleri  $0 < x < 0.74$ ; a-SiN<sub>x</sub>:H'nin azot içerikleri ise  $0 < x < 0.52$  aralığında bulunmuştur. Fotolüminesans spektrumları 77 K'de uyarıcı ışık kaynağı olarak Ar<sup>+</sup> lazeri (2.71 eV) ve Xe-He lambası (3.4 eV) ile ölçülmüştür. Ardından fotolüminesans spektrumuna Gauss eğrileri uydurulmuştur. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerde karbon içeriğinin artması, a-SiN<sub>x</sub>:H filmlerde ise azot içeriklerinin artması ile birlikte, fotolüminesans maksimumunun daha yüksek enerjilere kaydığı ve tam genişlik yarı maksimumunun da arttığı gözlemlenmiştir. a-SiN<sub>x</sub>:H ( $0 < x < 0.52$ ) ve a-SiC<sub>x</sub>:H ( $0 < x < 0.5$ ) filmlerin  $\Delta E_L$  dik  $E_U$  grafiği çizilerek eğimden  $\Delta E_L/E_U$ , iki alaşım için de  $2.73\pm 0.28$  olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç çerçevesinde statik düzensizlik modelinin bu filmlerde baskın olduğu belirtilmiştir. Diğer yandan elektron-fonon çiftleşmesi katkısı olan  $\Delta E_L^{e-fn}$ , iki alaşım için de  $143\pm 0.44$  meV

olarak hesaplanmıştır ve bu değer in fotolüminesans bant şeklinin belirlenmesine olan katkısının küçük olduğu bildirilmiştir.

Ambrosone ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler cam ve kristal silisyum alttaşlar üzerine silan (SiH<sub>4</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. 50-300 W aralığında çeşitli RF güçleri uygulanmış ve hem silan hem de metanın akıları 0.6 sccm'e ayarlanmıştır. Alttaş sıcaklığı 400 °C ve reaktör basıncı 1.7 Torr olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu çalışmada RF gücünün büyütülen filmlerin özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Filmlerin kalınlıkları 0.6 ile 1.7 µm aralığında tespit edilmiştir. RF gücü arttıkça, E<sub>04</sub> optik enerjisinin (2.17-3.23 eV) lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. Fakat 300 W'lık RF gücünde E<sub>04</sub> 3.02 eV'a düşmüştür. Grafitik karbon adacıklarının oluşmasının buna sebep olduğu belirtilmiştir. RF gücünün artışı ile karbon içeriğinin, 0.2-0.57 aralığında düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda RF gücü ile Urbach enerjisinin de arttığı gözlemlenmiştir. Fotolüminesans spektrumları, enerjisi 3.53 eV olan Ar<sup>+</sup>/Kr lazeri kullanılarak oda sıcaklığında ölçülmüştür. Fotolüminesans spektrumu incelendiğinde, karbon içeriğinin artması (x=0.3-0.57) ile fotolüminesans maksimumunun 1.7 eV'tan 2.54 eV'a doğru kaydığı tespit edilmiştir. Ayrıca fotolüminesans maksimumları RF gücüne bağlı olarak da incelenmiştir. Bunun neticesinde, karbon içeriği arttıkça hem düşük güç hem de yüksek güçte büyütülen filmlerin fotolüminesans maksimumunun arttığı ancak yüksek güçte düşük güce göre daha yüksek bir artış olduğu bildirilmiştir.

Liu ve ark. (1997) tarafından yapılan çalışmada N ve F ile katkılanmış a-C:H filmler kuvars alttaşlar üzerine CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> ve NF<sub>3</sub> kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. 28 mW/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu uygulanarak çeşitli gaz konsantrasyonlarına ayarlanmıştır. Alttaş sıcaklığı 100 °C ve reaktör basıncı 2 Torr olacak şekilde uygulanmıştır. Bu çalışmada büyütülen filmlerin kalınlıkları yaklaşık 4000 Å olarak belirlenmiştir. Büyütülen 4 adet filmin fotolüminesans uyarılma enerjilerinin ve katkılama oranlarının, fotolüminesans maksimumları ve tam genişlik yarı maksimumları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Filmlerin hidrojen konsantrasyonları a-C:H için % 73.8, a-C:H,N için % 67.3, a-C:H,N,F için % 63.2, a-C:H,F için % 57.4 bulunmuştur. Bu filmlerin E<sub>Tauc</sub> optik enerjileri sırasıyla 3.1, 2.9, 2.8, 2.6 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Urbach enerjileri 117 meV ile 489 meV aralığında tespit edilmiştir. Azot ve florun filmlere dahil olmasıyla düzensizliğin arttığı sonucuna varılmıştır. Fotolüminesans spektrumları oda sıcaklığında, 325 nm'de He-Cd lazer, 363 nm'de civa lambası, 457, 488 ve 517 nm'de Argon-iyon lazer ve 543 nm'de He-Ne lazer kullanılarak ölçülmüştür. 363 nm ile uyarılan

filmlerin fotoluminesans spektrumu Gauss eğrilerine uydurulmuş ve fotoluminesans maksimumu ve tam genişlik yarı maksimumları belirlenmiştir. Fotoluminesans maksimumu a-C:H için 2.89 eV bulunmuştur. Azot ve flor içeriği arttıkça fotoluminesans maksimumunun daha düşük enerjilere kaydığı, tam genişlik yarı maksimumunun ise 1.03 eV'tan 0.75 eV'a doğru azaldığı gözlemlenmiştir. a-C:H,F filmler, 325-543 nm aralığında 6 farklı dalga boyunda uyarılmıştır. Bunun sonucunda uyarılma enerjisinin 3.4 eV'un üzerinde olduğu durumda fotoluminesans maksimumu 2.36 eV ve tam genişlik yarı maksimumu 0.75 eV civarında tespit edilmiştir. Uyarılma enerjisinin 3.4 eV'un altında olduğu durumlarda ise fotoluminesans maksimumunun daha düşük enerjilere kaydığı ve tam genişlik yarı maksimumunun daraldığı gözlemlenmiştir.

Searle ve Jackson (1989) tarafından yapılan çalışmada a:SiN<sub>x</sub>:H filmler cam alttaşlar üzerine, alttaş sıcaklığı 590 K'de tutularak parlama deşarj sistemi ile büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin fotoluminesans özellikleri araştırılarak elektron-fonon çiftleşmesi ve statik düzensizlik modelleri çerçevesinde incelenmiştir. Yapılan analizler, önceki çalışmalarda incelenen alaşımların (a-SiC<sub>x</sub>:H, a-SiGe<sub>x</sub>:H) sonuçları ile desteklenmiştir. Filmlerin kalınlıkları 600-2200 nm aralığında tespit edilmiştir. Fotoluminesans spektrumları 4 K'de uyarıcı ışık kaynağı olarak Ar<sup>+</sup> ya da Kr<sup>+</sup> lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Fotoluminesans maksimumunun ve tam genişlik yarı maksimumunun azot içeriğinin artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca  $(\Delta E_L)^2$  ile  $E_{Tauc}-E_L$  arasında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. Fotoluminesans ışıma mekanizmalarından elektron-fonon çiftleşmesi modelinin katkısını araştırmak için grafiğin eğiminden fonon enerjisi 515±75 meV olarak, Stokes kayması da 0.02 eV bulunmuştur. Statik düzensizlik modeli ışığında filmler incelendiğinde ise  $\Delta E_L$  dik  $E_U$  grafiği çizilerek eğimden  $\Delta E_L/E_U=4.4\pm 0.2$  tespit edilmiştir. Sonuç olarak, büyütülen a:SiN<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans ışıma mekanizmaları incelendiğinde spektrum şeklinin belirlenmesinde elektron-fonon çiftleşmesi modelinin daha baskın olduğu bildirilmiştir.

Ma ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler çeşitli konsantrasyonlarda ksilen (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>) ve silan (SiH<sub>4</sub>) kaynak gazları (M=C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>/SiH<sub>4</sub>+C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>) kullanılarak, 200 mW/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu uygulanarak, 200 °C alttaş sıcaklığı ve 100-150 mTorr basınç altında PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin optik enerjileri ( $E_{Tauc}$ ) morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi analizlerinden yararlanılarak 2.3, 3.1, 3.5, 3.6 eV olarak bulunmuştur. Fotoluminesans spektrumları oda sıcaklığında, 300 nm'de ksenon lamba kullanılarak ölçülmüştür.  $E_{Tauc}>3.0$  eV olan filmlerin fotoluminesans maksimumları 420, 470, 520 nm olarak,  $E_{Tauc}<3.0$  eV olan filmin

fotoluminesans maksimumu ise 630 nm olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, fotoluminesans tam genişlik yarı maksimumu yaklaşık olarak 100-150 nm aralığında tespit edilmiştir. Sonuç olarak, oda sıcaklığında 420-630 nm aralığında fotoluminesans ışıması gözlemlendiği bildirilmiştir.

Sussman ve Ogden (1981) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler silan (SiH<sub>4</sub>) ve etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak parlama deşarj sistemi ile büyütülmüştür. 10-25 W aralığındaki çeşitli güçler uygulanarak, gaz akıları yaklaşık 5-10 sccm olarak ayarlanmıştır. Alttaş sıcaklığı 400 °C civarında ve reaktör basıncı 0.2-0.5 mbar aralığında olacak şekilde uygulanmıştır. Yaklaşık 1 µm kalınlığındaki filmlerin optik ve fotoluminesans özellikleri incelenmiştir. Elektron sondası mikro analizeri (EPMA) ve Auger elektron spektroskopisi (AES) yardımıyla filmlerin element kompozisyonu yapılmıştır. EPMA sonuçlarından elde edilen karbon içerikleri x=0-0.85 aralığında belirlenmiştir. SiH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> karışımında silanın yüzdece artması ile karbon içeriği artmıştır. 300 °C alttaş sıcaklığında büyütülen filmlerin soğurma katsayıları incelendiğinde karbon içerikleri arttıkça bant uzantı durumlarının yaygınlaştığı ve fonon enerjisinin daha yüksek enerjilere kaydığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, saf a-Si:H ve saf a-C:H'un kırılma indisleri yaklaşık olarak sırasıyla 3.8 ve 1.8 bulunmuştur. Fotoluminesans spektrumu 77 K ve 300 K'de, 422 nm dalgaboylu He-Cd lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Fotoluminesans spektrumu incelendiğinde karbon içerikleri arttıkça maksimumların daha yüksek enerjilere kaydığı ve tam genişlik yarı maksimumunun genişliklerinin de arttığı görülmüştür. x=0.22 ve x=0.85 için, 77 K ve 300 K'de ölçülen fotoluminesans spektrumları incelendiğinde fotoluminesans maksimumlarının ve tam genişlik yarı maksimumlarının sıcaklıkla büyük oranda değişmediği ancak 300 K'de fotoluminesans yoğunluğunun daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Wang ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler cam ve silisyum alttaşlar üzerine SiH<sub>4</sub> (Argonda %10 seyreltilmiş) ve etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak çeşitli gaz konsantrasyonlarında ( $M=2C_2H_4/(2C_2H_4+SiH_4)$ ), 50 W (Düşük güç (DG)) ve 100 W (Yüksek güç (YG)) olmak üzere iki farklı RF gücü altında PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. Hidrojenin gaz akısı 25 sccm ve toplam gaz akısı da 50-125 sccm olacak şekilde ayarlanmıştır. 220 °C alttaş sıcaklığı ve 200 mTorr reaktör basıncı uygulanmıştır. DG ve YG filmlerde gaz konsantrasyonları ile karbon içeriği arasında lineer bir ilişki olduğu görülmüştür. Optik enerji (E<sub>Tauc</sub>), a-Si:H için 1.87 eV ve a-C:H için 2.84 eV olarak hesaplanmıştır. Karbon içeriğinin artmasıyla optik enerjinin arttığı gözlemlenmiştir. Fotoluminesans spektrumları oda sıcaklığında, 514.5 nm

dalgaboylu  $Ar^+$  lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Fotolüminesans spektrumu, Gauss eğrilerine uydurularak fotolüminesans maksimumları ve tam genişlik yarı maksimumları hesaplanmıştır.  $x=0.33, 0.36, 0.50, 0.64$  için fotolüminesans maksimumları 1.63, 1.83, 1.83, 1.98 eV ve tam genişlik yarı maksimumları da 0.15, 0.17, 0.20, 0.18 eV olarak belirlenmiştir.

Magalhaes ve ark. (1993) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler silan (SiH<sub>4</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) gazları kullanılarak hidrojenle % 97.7'lik seyreltme (H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>+SiH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>) (YS; yüksek seyreltme) ve %0'lık seyreltme (DS; düşük seyreltme) oranlarında parlama deşarj sistemi ile büyütülmüştür. YS filmler kuvars alttaşlar üzerine sıcaklığı 320 °C'de, DS filmler ise cam alttaşlar üzerine sıcaklığı 260 °C'de tutulmuştur. Soğurma katsayıları foto-termal sapma spektroskopisi ile belirlenmiş olup, optik enerjileri ( $E_{Tauc}$ ) 1.75 eV (a-Si:H) ile 2.15 eV aralığında bulunmuştur. Fotolüminesans spektrumu 77 K ve 200 K arasındaki sıcaklıklarda, 514.5 nm dalgaboylu  $Ar^+$  lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Fotolüminesans spektrumları elektron-fonon çiftleşmesi modeli ışığında incelenmiştir. Statik düzensizlik modeli, ışınma mekanizmasına katkısının küçük olduğu varsayılarak ihmal edilmiş ve fonon enerjisi yaklaşık olarak 0.084 eV olarak bulunmuştur. Tipik fonon enerjisinin, a-Si:H için 60 meV ve a-SiC<sub>x</sub>:H için 80 meV olduğu belirtilerek, ortalama 70 meV olduğu varsayılmıştır. Stokes kayması ise yaklaşık olarak 0.036 eV olarak hesaplanmıştır.

Demichelis ve ark. (1995) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler SiH<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub> ve C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. CH<sub>4</sub> gazı kullanılarak büyütülen filmlerin alttaş sıcaklığı 180 °C'ye ve RF gücü 4 W'a ayarlanmıştır. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gazı kullanılarak büyütülen filmlerin ise alttaş sıcaklığı 200 °C'ye ve RF gücü 3 W'a ayarlanmıştır. Bu çalışmada filmlerin optik, yapısal ve fotolüminesans özellikleri incelenmiştir. Film kalınlıkları 500-1500 nm aralığında belirlenmiştir. Karbon içerikleri Rutherford geri-saçılma spektroskopisi yardımı ile belirlenmiştir. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> gazı kullanılarak büyütülen filmlerin karbon içerikleri % 15 ile % 39.2, CH<sub>4</sub> gazı kullanılarak büyütülen filmlerin karbon içerikleri ise % 6.3 ile % 27.9 arasında bulunmuştur. Bu sonuçlar ışığında, metan plazmasında karbon birleşmelerinin asetilenden daha düşük çıktığı belirtilmiştir. Karbon içeriğinin artışına bağlı olarak artan optik enerjileri ( $E_{04}$ ) 2.3 eV ile 3.5 eV arasında hesaplanmıştır. Fotolüminesans spektrumları oda sıcaklığında, 488 nm dalgaboylu  $Ar^+$  lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Optik enerjinin artmasına bağlı olarak fotolüminesans maksimumunun arttığı bildirilmiştir.

Xu ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler silisyum alttaşlar üzerine silan (SiH<sub>4</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak, 65 mW/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu ve 100 °C alttaş sıcaklığı altında, PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. Gaz konsantrasyonları (M=CH<sub>4</sub>/SiH<sub>4</sub>) 2-15 aralığında ayarlanmıştır. Büyütülen filmlerin kalınlıkları 400-600 nm aralığında bulunmuştur. Karbon içerikleri, M=2 ve M=15 için sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 42 olarak belirlenmiştir. Optik enerjinin (E<sub>Tauc</sub>) ise, gaz konsantrasyonunun artması ile birlikte 2.05-2.65 eV aralığında arttığı bulunmuştur. Fotoluminesans spektrumları oda sıcaklığında, 350 nm dalgaboylu Xe lamba ve 488 nm dalgaboylu Ar<sup>+</sup> lazeri kullanılarak ölçülmüştür. Gaz konsantrasyonunun artmasıyla fotoluminesans yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bu azalışın, özellikle yüksek gaz konsantrasyonlarında (M=10, 15) daha fazla olduğu ve optik enerjinin (E<sub>Tauc</sub>) artmasından dolayı da fotoluminesans maksimumunun daha düşük dalgaboylarına kaydığı belirtilmiştir. Fotoluminesans maksimumları 445 nm ve 525 nm aralığında, tam genişlik yarı maksimumları 55 nm ve 70 nm aralığında bulunmuştur.

Wang ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler silisyum alttaşlar üzerine silan (SiH<sub>4</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak, 320 °C alttaş sıcaklığında, 95 mW/cm<sup>2</sup> (Yüksek güç (YG)) ve 63 mW/cm<sup>2</sup> (Düşük güç (DG)) olmak üzere iki farklı güç yoğunluğu altında PDKBB sistemi ile büyütülmüştür. Silan gazının akısı 5-10 sccm ve metan gazının akısı 5-45 sccm aralığında olmak üzere gaz konsantrasyonları (M=CH<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub>+SiH<sub>4</sub>), YG filmlerde % 50, 80, 90 ve DG filmlerde % 50, 90 olacak şekilde ayarlanmıştır. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin, optik ve yapısal özellikleri araştırılmıştır. Karbon içerikleri, X-ışını foto-elektron spektroskopisi ile sırasıyla YG filmlerde % 12.5, 25.3 ve 36.5, DG filmlerde % 54 ve 63 olarak belirlenmiştir. YG filmlerin optik enerjileri (E<sub>Tauc</sub>) 2.05, 2.32, 2.57 eV olarak hesaplanmış ve gaz konsantrasyonunun artması ile optik enerjilerinin (E<sub>Tauc</sub>) arttığı gözlemlenmiştir. DG filmlerin optik enerjileri (E<sub>Tauc</sub>) ise 2.35 eV ve 2.05 eV olarak hesaplanmış ve gaz konsantrasyonunun artması ile optik enerjilerinin (E<sub>Tauc</sub>) azaldığı gözlemlenmiştir.

Palsule ve ark. (1993) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler Ar ve H<sub>2</sub> gaz atmosferinde sıçratma sistemi ile büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin kalınlıklarının 0.3-2 µm aralığında olduğu belirlenmiştir. Karbon içerikleri nötron kütle spektroskopisi yardımı ile belirlenmiştir. Karbon içeriği arttıkça, filmlerin optik enerjisinin (E<sub>Tauc</sub>) 1.7 eV'tan (x=0) 2.15 eV'a (x=0.66) kadar arttığı, fakat x=0.99'da 1.97 eV'a düştüğü gözlemlenmiştir. Urbach enerjileri ise karbon içeriklerinin artışı ile artmıştır. Başlangıçta göreceli olarak daha az bir artış görülür iken x=0.6'dan sonra daha fazla bir artış



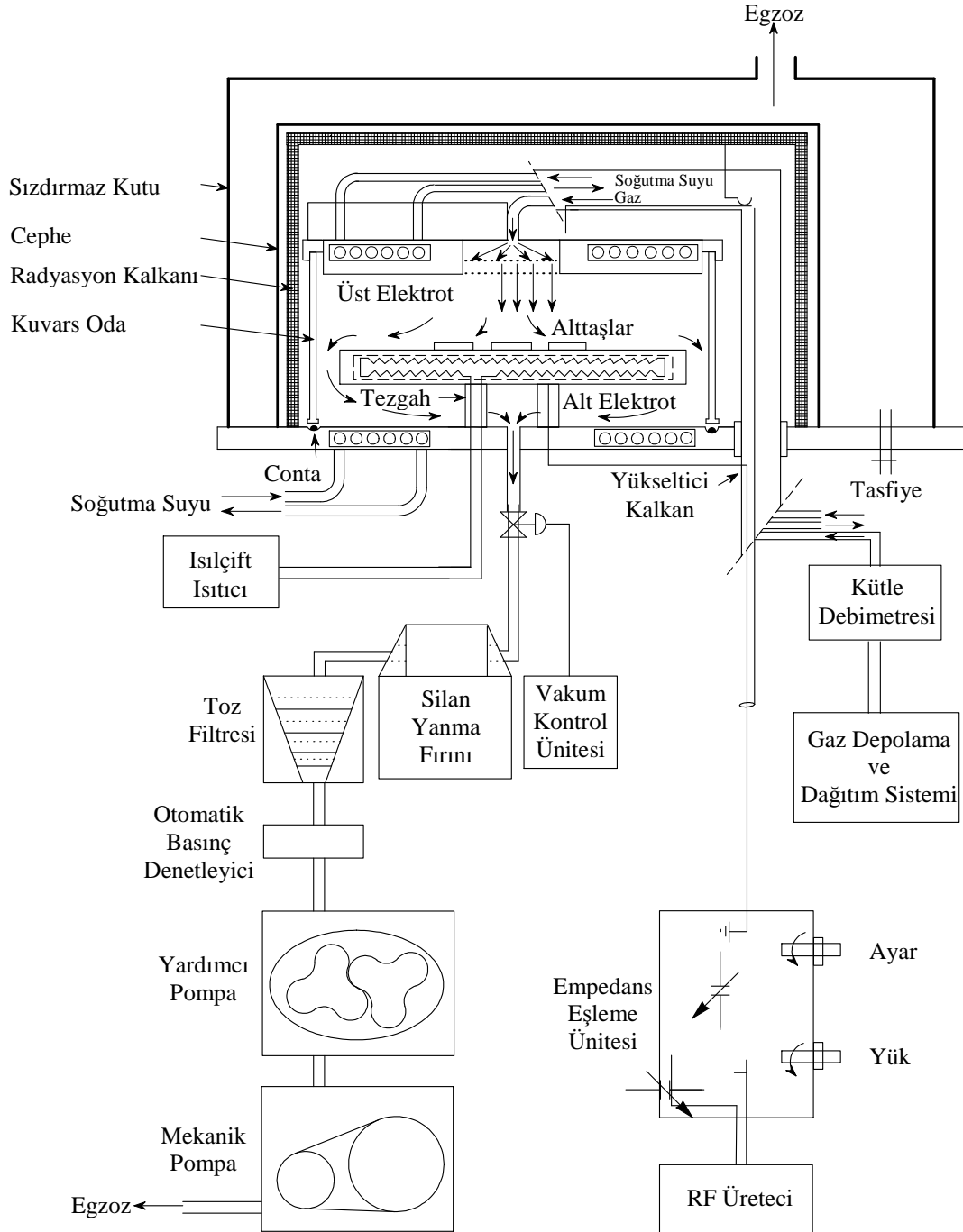
gözlemlenmiştir. Fotolüminesans spektrumları, 25 K sıcaklıkta, 2.28 eV enerjili He-Ne lazer kullanılarak ölçülmüştür.  $0 < x < 0.45$  aralığında karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak fotolüminesans tam genişlik yarı maksimumunun arttığı, fotolüminesans maksimumunun ise neredeyse değişmediği;  $x > 0.45$  aralığında ise hem fotolüminesans maksimumunun hem de tam genişlik yarı maksimumunun arttığı gözlemlenmiştir. Fotolüminesans spektrumları statik düzensizlik modeli ile incelenmiştir.  $\Delta E_L$  dik  $E_U$  grafiğinin eğiminden hesaplanan  $\Delta E_L/E_U$  1.3 ile 1.8 bulunmuştur. Hesaplanan iki değer de literatürdeki diğer çalışmalarda hesaplanan değerlere göre daha küçük olduğu ifade edilmiştir. Ancak genel olarak, fotolüminesans maksimumu ile Urbach enerjisi arasında doğrusal bir ilişki gözlenmesinden dolayı statik düzensizlik modelinin bu filmlerde baskın olduğu belirtilmiştir.

Kumbhar ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada a-SiC<sub>x</sub>:H filmler silisyum alttaşlar üzerine silan (SiH<sub>4</sub>) ve asetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) kaynak gazları kullanılarak farklı gaz konsantrasyonlarında ( $M=C_2H_2/SiH_4$ ), 250 °C alttaş sıcaklığı ve 100 mTorr reaktör basıncı altında katalitik kimyasal buhar biriktirme (Kat-KBB) sistemi ile büyütülmüştür. Gaz konsantrasyonunun artması ile optik enerjinin ( $E_{Tauc}$ ) 2 ile 2.65 eV aralığında arttığı ve  $M=0.8$  için daha da hızlı artarak 3.6 eV'a çıktığı gözlemlenmiştir. Fotolüminesans spektrumları oda sıcaklığında, 350 nm dalgaboylu uyarıcı ışık kaynağı kullanılarak ölçülmüştür. Fotolüminesans maksimumunun 1.92-2.21 eV aralığında, tam genişlik yarı maksimumunun ise 0.25-3 eV aralığında olduğu belirlenmiştir.

### **BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi ve a-SiC<sub>x</sub>:H İnce Filmlerin Büyütülmesi**

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB) sistemi (Plasma Lab µP 80), plazma reaktörü ve kaynak gazları depolama ve dağıtım sistemi olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Filmler, reaktör kısmında büyütülmektedir. Reaktör kısmının en dışında sızdırmaz kutu bulunmaktadır. Sürekli vakumda tutulan bu kısım, reaktörün ana kısmı açıldığında iinin kirlenmesini minimum düzeye indirmektedir. Ana kısım ise radyasyon kalkanı ile çevrelenmiş kuvars cam duvarlı silindirik bir odadır. Reaktörün içinde birbirine paralel 24 cm çaplı iki elektrot bulunmaktadır. Gaz depolama ve dağıtım sisteminden her biri ayrı kanaldan gelen kaynak gazlarının her birinin akısı kütle debimetresi ile 1 ccm ve 200 ccm arasında ayarlanabilmektedir. Kaynak gazları reaktör odasına üst elektrodun merkezinde yer alan duş şeklindeki girişten gönderilmektedir. Filmlerin büyütüleceği alttaşlar alt elektrodun üstüne yerleştirilmektedir. Alt elektrodun içinde bulunan rezistanslar ve ısıçiftli sıcaklık kontrolü ünitesi ile alttaş sıcaklığı 0 ile 400 °C arasında ayarlanabilmekte ve büyütme işlemi boyunca sabit tutulabilmektedir. Üst elektrotun içinden ve reaktör odasının altından geçen borulardan devamlı akan soğuk su ile reaktörün ısınması önlenmektedir. Reaktörün içi yardımcı ve mekanik pompaları ile vakumlanmaktadır. Otomatik vakum kontrol ünitesi ile vakum seviyesi atmosferik basınç ile 0.1 mTorr arasında ayarlanabilmekte ve büyütme boyunca sabit tutulabilmektedir. Silan gazı ve diğer yanıcı gazlar reaktörden çıktıktan sonra, kontrollü bir şekilde silan yakma fırınında yakılır ve sonrasında egzozdan dışarıya salınırlar. PDKBB sisteminde 13.56 MHz radyo frekansı (RF) kullanılmaktadır. Plazmanın sürdürülebilmesi ve uygulanan RF gücünün filmlerin büyütülmesinde maksimum verimle kullanılabilmesi için RF üretici bir empedans eşleme ünitesine bağlıdır. Eğer RF jeneratörün çıkış empedansı reaktörün empedansı ile eşleşmiyorsa, elektrotlara jeneratörden ek güç transferine gerek duyulur. Maksimum güç uygulandığında güç yoğunluğu 0.66 W/cm<sup>2</sup> olmaktadır. Sonuç olarak, plazma sisteminde film büyütülürken kaynak gazları ve akı oranları, alttaş sıcaklığı, basınç ve RF güç yoğunluğu ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.1. PDKBB sistemi.

Uygun RF gücü, basınç ve gaz akı oranları altında reaktördeki gaz, plazma haline dönüşür. Plazma ortamında gerçekleşen reaksiyonlar genellikle çok çeşitlidir. Fakat genel olarak beş başlık altında gruplanabilir:

- a)  $e^- + X_2 \rightarrow X_2^* + e^-$  (Uyarılma)
- b)  $e^- + X_2 \rightarrow X^- + X^-$  (Ayrışmalı bağlanma)
- c)  $e^- + X_2 \rightarrow 2X + e$  (Ayrışma ‘iyonlaşmadan parçalanma’)
- d)  $e^- + X_2 \rightarrow X_2^+ + 2e^-$  (İyonlaşma)
- e)  $e^- + X_2 \rightarrow X^+ + X^+ + 2e^-$  (İyonlaşarak ayrışma)

Bu çalışmada incelenen a-SiC<sub>x</sub>:H filmler cam alttaşlar üzerine, silan (SiH<sub>4</sub>) ve etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) kaynak gazları kullanılarak PDKBB sistemi ile büyütülmüştür (Sel, 2007). 30 mW/cm<sup>2</sup> düşük güç (DG) ve 90 mW/cm<sup>2</sup> yüksek güç (YG) olmak üzere iki farklı güç yoğunluğu uygulanmıştır. Her bir güç yoğunluğu için, toplam akı 20 ccm olmak üzere, gaz konsantrasyonları ( $M=(C_2H_4)/(SiH_4+C_2H_4)$ ) 0.0, 0.2, 0.5 ve 0.7 olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla 8 farklı a-SiC<sub>x</sub>:H film büyütülmüştür. Hidrojenleme için kaynak gazlarının toplam akısına ek olarak 200 ccm hidrojen gazı sürekli reaktöre gönderilmiştir. Alttaş sıcaklığı 250 °C’ye ve reaktör basıncı 0.5 Torr’a ayarlanmıştır.

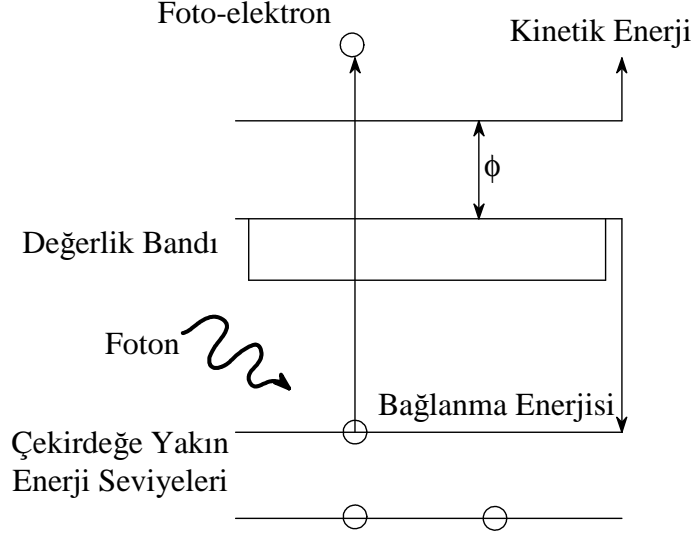
### 3.2. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Sistemi

Filmlerin element kompozisyonu, X-ışını foto-elektron spektroskopisi (XPS) ile belirlenmiştir. XPS sisteminde analiz edilmek istenilen hedef örneğe yüksek enerjili fotonlar gönderilir. Bu fotonlar, örnek maddeyi oluşturan atomlar tarafından soğurulur ve çekirdeğe yakın enerji seviyelerindeki elektronların iyonlaşmasına sebep olur (Şekil 3.2).

$$KE = h\nu - BE - \phi \quad (3.1)$$

Burada ‘KE’ foto-elektronun kinetik enerjisi, ‘BE’ bağlanma enerjisi, ‘ $\phi$ ’ iş fonksiyonu ve ‘ $h\nu$ ’ fotonun enerjisidir. Foto-elektron yayılması ancak  $BE + \phi > h\nu$  durumunda mümkündür.

Yayılan foto-elektronların kinetik enerjileri, uygun elektron enerjisi analizörü ile ölçülmektedir. Böylece, elde edilen veriler bilgisayara aktarılarak X-ışını foto-elektron spektrumu ölçülmüş olur.



Şekil 3.2. XPS’de foto-emisyon işlemi.

a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin element kompozisyonu, SPCS ESCA (Berlin/ALMANYA) XPS sistemiyle incelenmiştir. XPS monokromatik olmayan Al K $\alpha$  ışınımı kullanılarak kaydedilmiştir. X-ışını 90°’lik açı ile gönderilmiş ve X-ışını kaynağı 250 W güçte çalıştırılmıştır. Foto-elektronların kinetik enerjileri, 18 farklı kanallı detektör (MCD) ile donatılmış EA 200 yarımküresel elektrostatik enerji analizörünün 144 eV sabit giriş modunda çalıştırılması ile ölçülmüştür.

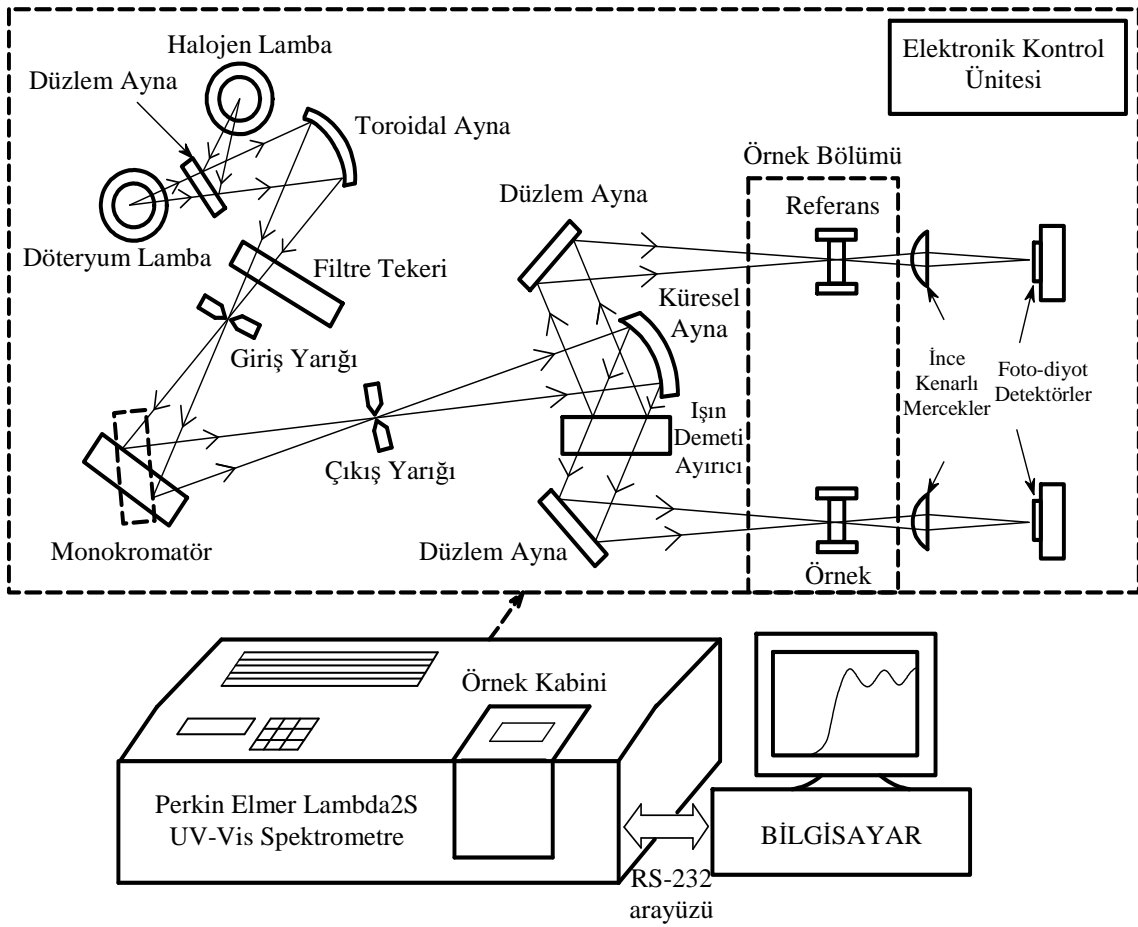
XPS ölçümlerinden önce, filmlerin yüzeylerinde çeşitli sebeplerden oluşmuş yüzey kirliliğinin temizlenmesi gerekir. Bu amaçla filmlerin yüzeyleri, 5 keV Ar iyonları saçan iyon sıçratma sistemiyle 15 dk. boyunca aşındırılarak temizlenmiştir. Bu işlemden hemen sonra, XPS 0.2 eV enerji çözünürlüğünde birkaç kez taranarak ölçülmüştür.

### 3.3. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Sistemi

Morötesi-görünür bölge geçirgenlik (UV-Visible) spektroskopisi ile filmlerin kalınlığı, kırılma indisi, soğurma katsayısı ve optik enerjileri belirlenmiştir.

a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin UV-Visible spektroskopisi ölçümleri Perkin Elmer Lambda2S sistemiyle, bilgisayar kontrollü olarak ölçülmüştür (Şekil 3.3). Bu sistem çift ışın demeti kaynağına ve ölçüm detektörüne sahiptir. 200-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüm yapabilmektedir. Işık kaynakları olarak, döteryum ve tungsten-halojen lambalar kullanılmıştır. Kaynaktan gelen ışık, monokromatör tarafından dalgaboylarına ayrıştırılmaktadır. Bu amaçla 1053 çizgi sayısı/mm’li içbükey holografik kırınım ağı kullanılmıştır. Sonrasında ışık, ışın demeti ayırıcısı ile ikiye ayrılır ve bir kısmı örnekten,

diğer kısmı ise referanstan geçerek foto-diyot detektörlere ulaşır. Elde edilen veri, RS-232 arayüzü ile bilgisayara iletilir ve bilgisayarda kaydedilir. UV-Visible spektrumları, OptiChar optik analiz yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir (OptiChar Software, 2002). OptiChar yazılımının bazı durumlarda nümerik olarak doğru olan birden fazla çözüm bulabileceği tecrübe edilmiştir. Bu gibi durumlarda fiziksel olan doğru çözümün belirlenmesi ve ayrıca farklı bir metotla analizlerin sağlanmasının yapılması amacıyla, spektrumlar bir kez de Swanepoel metodu kullanılarak analiz edilmiştir (Manificier, 1976; Swanepoel, 1983, 1984; Akaoğlu, 2004).

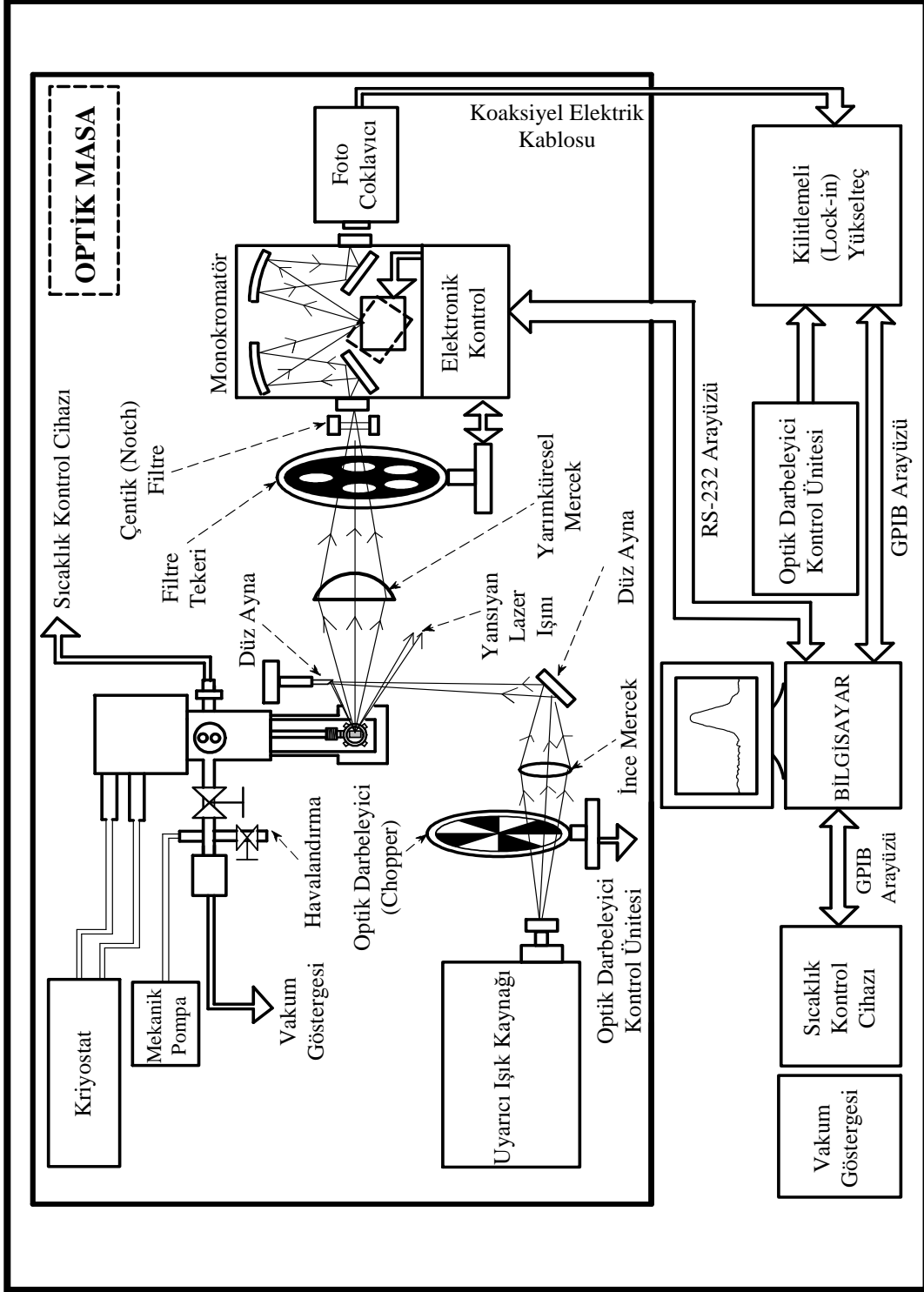


Şekil 3.3. Morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopi sistemi.

### 3.4. Fotolüminesans Spektroskopi Sistemi

Bu çalışma kapsamında, bilgisayar ile otomatik olarak kontrol edilebilen ve ölçüm verileri kaydedilebilen fotolüminesans spektroskopisi ölçüm sisteminin kurulumu ve optimizasyonu başarı ile gerçekleştirilmiştir. Fotolüminesans spektroskopi ölçüm sistemi; optik masa, uyarıcı ışık kaynağı, optik darbeleyici (chopper), çeşitli mercek, ayna, filtre...

gibi optik bileşenler, kriyostat, sıcaklık kontrol cihazı, monokromatör, foto-çoklayıcı (photomultiplier), kilitlemeli yükselteç (Lock-in amplifier) ve bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Fotoluminesans spektroskopi sistemi.

### **3.4.1. Optik Masa**

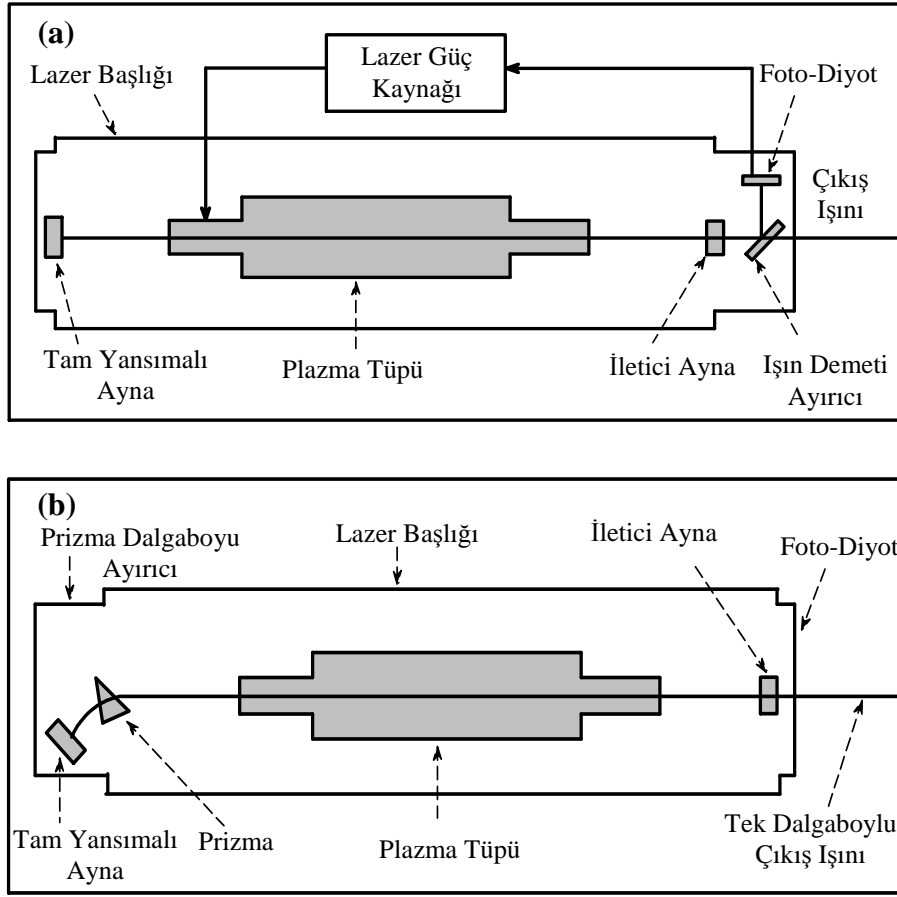
Uyarıcı ışık kaynağından çıkan ışık titreşimlere karşı çok hassas birçok optik bileşen ile örneğin yüzeyine yönlendirilmekte ve örnekten yayılan fotolüminesans aynı şekilde çok hassas bir şekilde foto-çoklayıcıya ulaştırılmaktadır. Dolayısıyla, bu optik düzenek titreşimlere karşı çok hassastır. Bu titreşimlerin ölçüm sistemini etkilememesi için fotolüminesans spektroskopi sistemini oluşturan bütün bileşenler, optik masanın üzerine sabitlenerek yerleştirilmişlerdir.

### **3.4.2. Uyarıcı Işık Kaynağı**

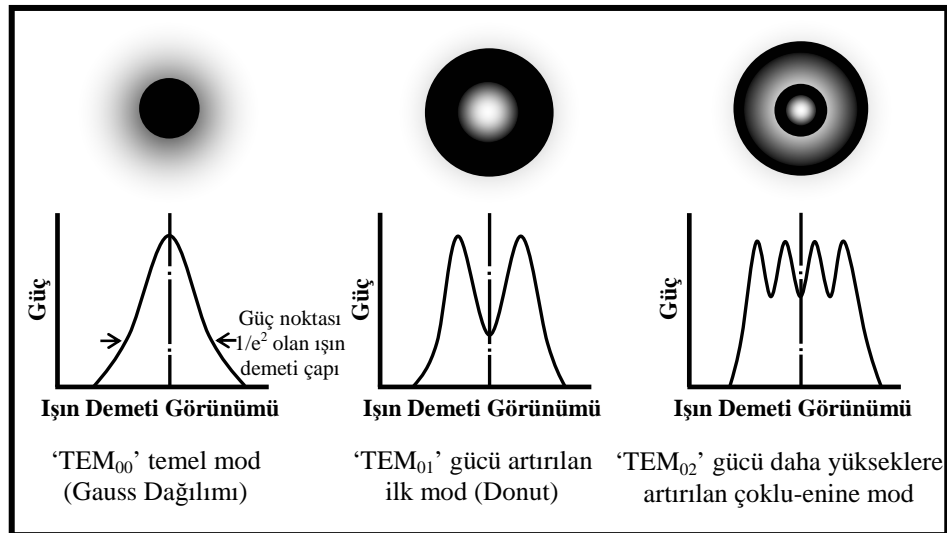
Uyarıcı ışık kaynağı olarak argon iyon lazeri kullanılmıştır (Ion Laser Technology 5500A model). İyon lazerleri elektromanyetik spektrumun mor-ötesi, görünür ve yakın kızıl-ötesi bölgelerinde ışın yapabilmektedir. İyon lazerlerinde genelde argon ve kripton gazları kullanılmaktadır. İstenilen lazer ışını gücünün ayarlanabilmesi, yüksek güçte lazer ışını üretebilmeleri ve kullanım ömürlerinin uzun olması sebebiyle fotolüminesans spektrumu ölçümleri için yaygın olarak tercih edilmektedirler. Çoklu dalgaboyunda ve tek dalgaboyunda ışın yapabilen modelleri bulunmaktadır (Şekil 3.5). Üretilen lazer ışını, açısı ayarlanabilir bir prizmadan ya da optik dağıtıcıdan geçirilerek kolaylıkla tek dalgaboylu ışına dönüştürülebilir ve istenilen dalgaboyuna ayarlanabilir.

Lazerin çıkışında ışın demeti ayırıcısı ışının bir kısmını foto-çoklayıcıya gönderir. Böylece lazer ışınının gücü sürekli ölçülür. İstenilen seviyedeki lazer ışını gücü bu ölçüme göre lazer güç kaynağının çıkış akımı değiştirilerek ayarlanabilir ve sabit tutulabilir. Üretilen lazer ışınının gücü ışın demeti boyunca değişim göstermektedir. Bu sebeple, genellikle enine (transverse) elektromanyetik modlu (TEM) lazer ışınları tercih edilmektedir. Temel modu  $TEM_{00}$  olan Gauss fonksiyonu güç dağılımına sahip bir ışın demetinin şeması Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu temel mod, ışın demeti çapının ve dağılımının minimuma indirilmesini de sağlamaktadır. Işının gücünün daha da artırılmasına gerek duyulan uygulamalarda ise  $TEM_{01}$  ve  $TEM_{02}$  modları da kullanılmaktadır. Bu temel modların üstündeki modlar ise çoklu enine mod (MTM) olarak adlandırılır. Lazerin modu, kullanılan aynaların değiştirilmesi ile ayarlanabilir.





Şekil 3.5. İyon lazerinin şeması: a) çoklu dalgaboylu, b) tek dalgaboylu.



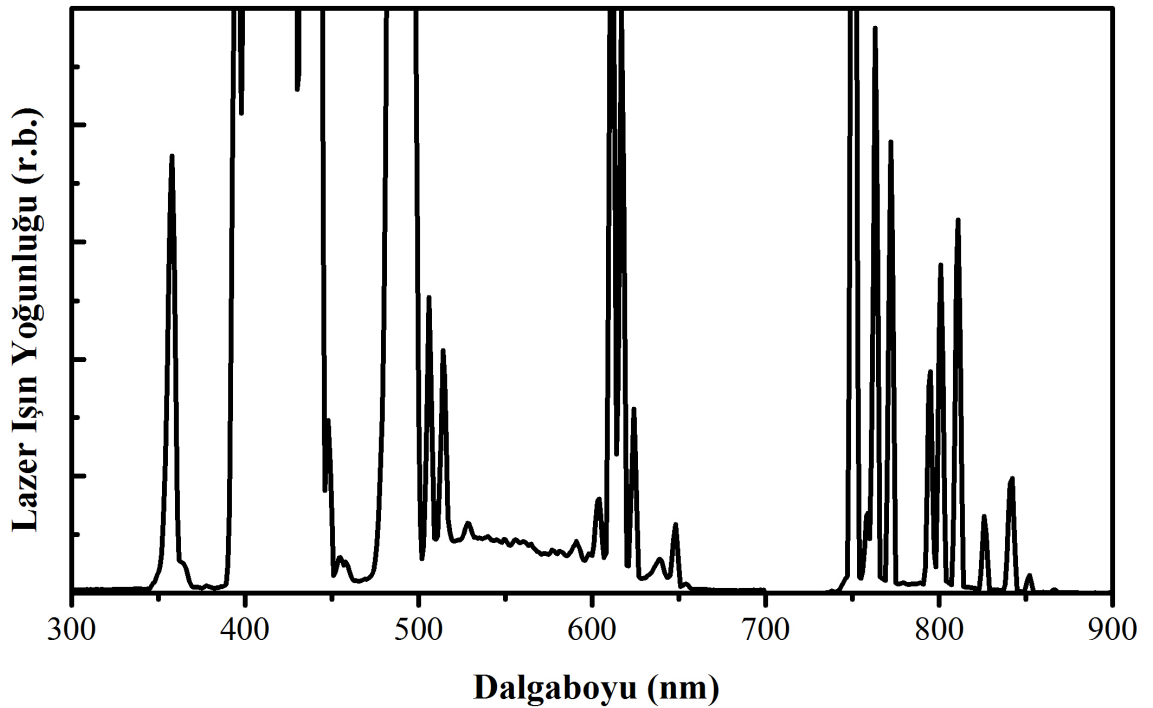
Şekil 3.6. Temel modu TEM<sub>00</sub> olan enine (transverse) elektromanyetik modlu (TEM) lazer ışınının çeşitli modlarının gösterimi.

Bu çalışmada kullanılan Ion-laser Technology 5500 A model argon iyonu lazeri 457 nm ile 514 nm aralığındaki 7 dalgaboyunda lazer ışını üretebilmektedir. Tek dalgaboylu ışınlar ve güçleri Çizelge 3.1’de listelenmiştir. Çoklu dalgaboyu için lazerin maksimum gücü 300 mW’tır. TEM<sub>00</sub> modunda doğrusal polarize ışın üretmektedir. Lazerin kararlılığının sağlanması için plazma tüpü metal rezonatörlerin içine yerleştirilmiştir. Soğutma için üstüne üç adet fan yerleştirilmiştir. Bir fan termostatu sürekli sıcaklığı ölçmekte ve uygun sıcaklığın sürdürülebilmesi için fanları kontrol etmektedir.

Çizelge 3.1. Ion-laser Technology 5500 A model lazerin ışına dalgaboyları ve güçleri.

Dalgaboyu (nm)	457.9	465.8	476	488	496.5	501	514
Güç (mW)	15	10	30	100	25	15	100

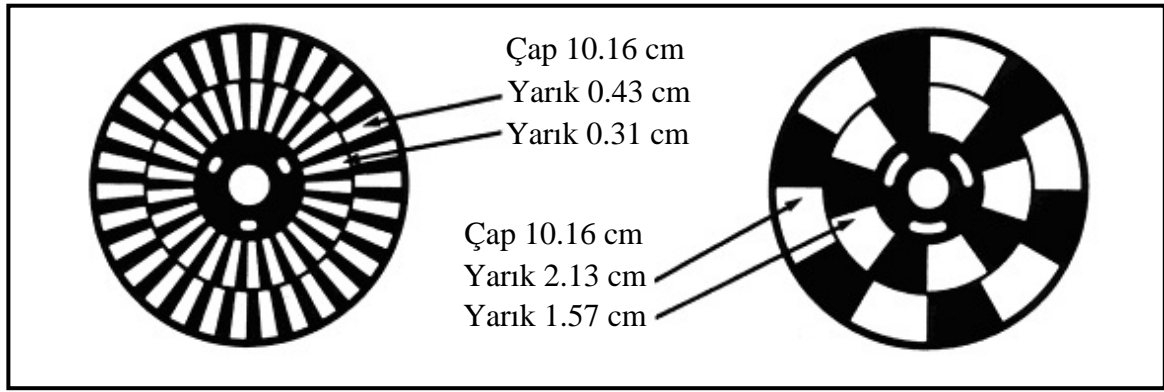
Argon iyon lazerinin 488 nm dalgaboyundaki ışına ayarlandığında ölçülen tam ışına spektrumu Şekil 3.7’de verilmiştir. Bu spektrumda 488 nm’deki lazer ışınının yanı sıra lazer tüpünde Ar gazının deşarj olmasından dolayı fazladan yaklaşık 400-450 nm aralığında bir ışına bandı, 360 nm’de, 620 nm’de ve 750-810 nm aralığındaki dalgaboylarında ışına çizgileri gözlemlenmiştir.



Şekil 3.7. Argon iyon lazerinin 488 nm’ye ayarlandığında ışına spektrumu.

### 3.4.3. Optik Darbeleyici

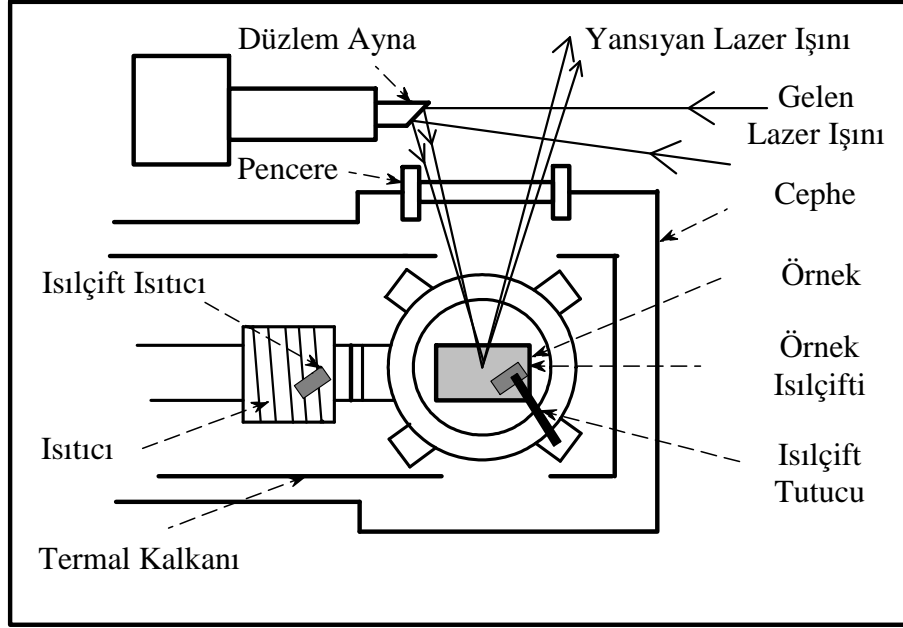
Fotolüminesans spektrumu ölçümünde Stanford Research Systems SR540 model optik darbeleyici kullanılmıştır. Optik darbeleyici, örnekten yayılan fotolüminesans sinyaline ek olarak çevreden ve deney aletlerinden kaynaklanan ışık ve elektrik sinyallerinin kilitlemeli yükselteç ile filtre edilmesi için uyarıcı ışığın frekansını modüle eder ve referans frekansını kilitlemeli yükseltece iletir. Optik darbeleyici, darbeyelici teker ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Yarıçapının yarısı kadar mesafede değişen iki farklı yarık dizaynından oluşan iki farklı darbeleyici tekerinin şeması Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Darbeleyici tekerlerin dönme frekansına bağlı olarak ışık bu tekerlerden geçerken 4 Hz ile 3.7 kHz arasında istenilen frekanslarda modüle edilebilmektedir. Frekans ayarı 1 Hz çözünürlükte ayarlanabilmektedir (SRS Model SR540 Optical Chopper Handbook, 2009).



Şekil 3.8. Darbeleyici tekerlerinin şematik gösterimi.

### 3.4.4. Optik Bileşenler

Uyarıcı ışık optik darbeleyiciden sonra örneğe yönlendirilmek üzere önce ince kenarlı bir mercek ile odaklanır ve sonrasında merceğin odak noktası kadar mesafe içine yerleştirilmiş olan iki adet düz ayna ile örneğin yüzeyine ulaştırılır (Şekil 3.9). Uyarıcı ışığın, örnekten yayılacak olan fotolüminesans ile beraber ışık detektörüne ulaşması, yoğunluğu çok az olabilen fotolüminesansın ölçülmesine engel olabilmektedir. Bu sebeple uyarıcı ışığın yönü, örneğin yüzey normaline olabildiğince büyük bir açı ile gelecek şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarın veriminin yükseltilebilmesi için de ikinci ayna olarak 1 mm çaplı ve yansıtıcı yüzeyi silindirik gövdesine 45°'lik eğimli olan bir ayna kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra örneğin ışıkla uyarılması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Soğutucunun örnek haznesi bölümünün şeması.

Örnekten yayılan fotoluminesans, odak uzaklığı 12 cm ve 1,5 f-numaralı yarım küresel bir ince kenarlı mercek ile monokromatörün giriş yarığına odaklanır. Monokromatörde fotoluminesansın ikincil ve üçüncül mertebelerinin detektöre gönderilmesini engellemek üzere gelen ışık, yüksek geçirgen (High-pass) bir grup filtrelerden oluşan ve monokromatör ile bağlantılı olarak senkronize bir şekilde RS-232 ve GPIB arayüzleri ile bilgisayar kontrolünde çalışan motorize Oriel model filtre tekerinden geçer. Ek olarak, örnek yüzeyinden yansıyan uyarıcı lazer ışınının da fotoluminesansın filtre edilmesi için sadece lazer ışını dalgaboyunu filtreleyen çentik (notch) filtreler kullanılmıştır.

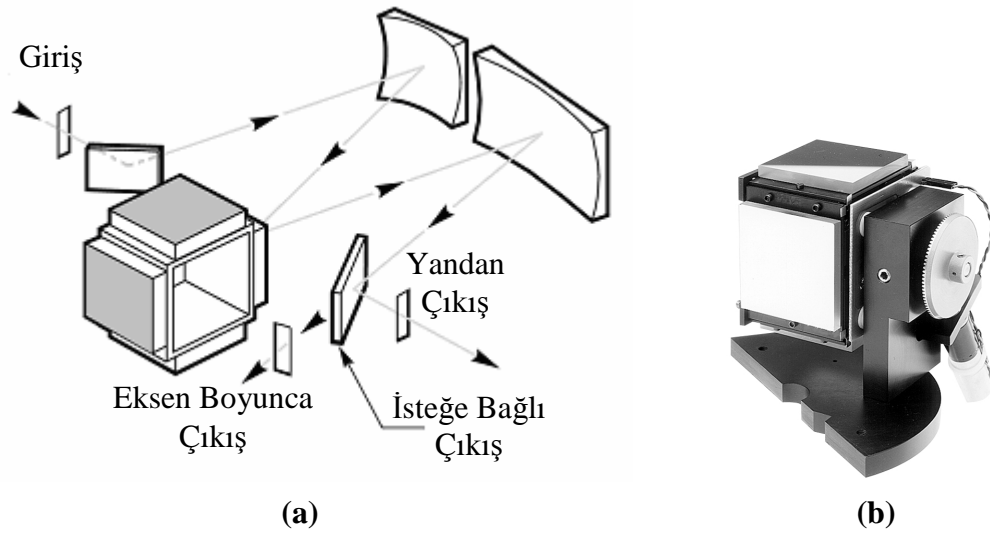
### 3.4.5. Kriyostat ve Sıcaklık Kontrol Cihazı

Ölçüm boyunca örneğin, 13-450 K arasında istenilen sıcaklıkta tutulması için Advanced Research Systems (ARS) S204 model kriyostat sistemi kullanılmıştır. Sıvı helyumla kapalı devre çalışan bu sistem üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, sıvı helyumun depolandığı ve örnek haznesine pompalandığı kısımdır. İkinci bölüm, örneğin yerleştirildiği hazne kısmıdır. Örnek, bu kısımda metal silindirik bir çubuğun ucundaki yerine yerleştirilir. Örneğin hemen yakınında ısıtma için çubuğa sarılmış rezistans bulunmaktadır. Metal çubuğun diğer ucunda ise sıvı helyum ile soğutulan gövde kısmı yer alır. Ayrıca örneğin ve örnek tutucunun sıcaklıklarını ayrı ayrı ölçebilmek için iki adet

ısılcıft bulunmaktadır. Bu ısılcıftlar ve ısıtıcı rezistans LakeShore 331 model sıcaklık kontrol cihazına bağlıdır. Bu cihazın kontrolü ile hedef sıcaklık çok kısa bir süre içerisinde ayarlanabilmekte ve ölçüm boyunca sabit tutulabilmektedir. Kriyostatın hazne kısmı, dış çevreden izole edilmek ve düşük sıcaklıklarda kara cisim ışımasının etkilerini minimuma indirmek üzere metal silindirik iç ve dış kılıf ile kapatılarak vakuma alınmaktadır. Uyarıcı ışığın örneğe ulaşması ve fotoluminesansın detektöre ulaşması için dış kılıfın örnek tutucuya denk gelen kısmında kuvars dairesel bir pencere bulunmaktadır. Kriyostatın üçüncü bölümü, mekanik vakum pompasından ve Leybold model iyonize vakum ölçüm detektörlerinden ve göstergelerinden oluşmaktadır.

### 3.4.6. Monokromatör

Fotoluminesansın dalga boylarına ayrıştırılması için Oriel MS257 model spektroskopik monokromatör kullanılmıştır (Şekil 3.10).



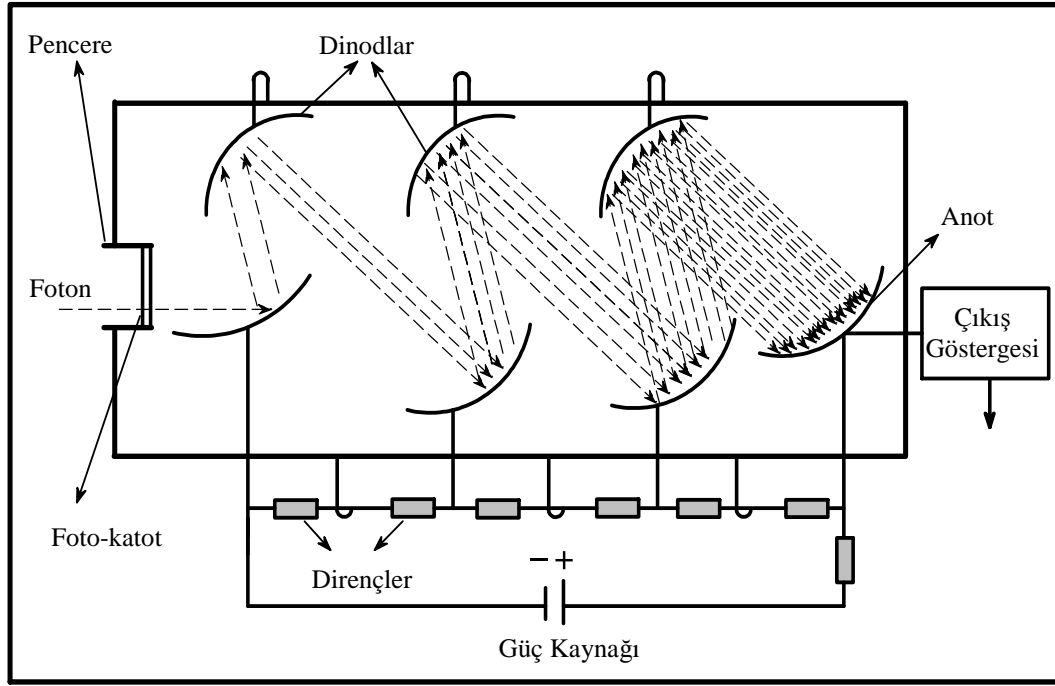
Şekil 3.10. a) Oriel MS257 model spektroskopik monokromatörde yandan ve eksen boyunca ilerleyen ışığın yolu b) çoklu kırınım ağı taret.

Monokromatörün giriş odak uzaklığı 22 cm, çıkış odak uzaklığı 25.74 cm ve f-numarası 3,9'dur. Giriş ve çıkış yarıklarının genişliği ayarlanabilmektedir. RS-232 ve GPIB arayüzleri ile bilgisayar tarafından kontrol edilebilmektedir. Monokromatör temel olarak dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar sırasıyla giriş penceresi, aynalar ve kırınım ağından oluşan optik sistem, çıkış penceresi ve mekanik/elektronik kontrol ünitesidir. Optik sistemde giriş ve çıkışta ışının yönlendirilmesi için iki düz ayna bulunur;

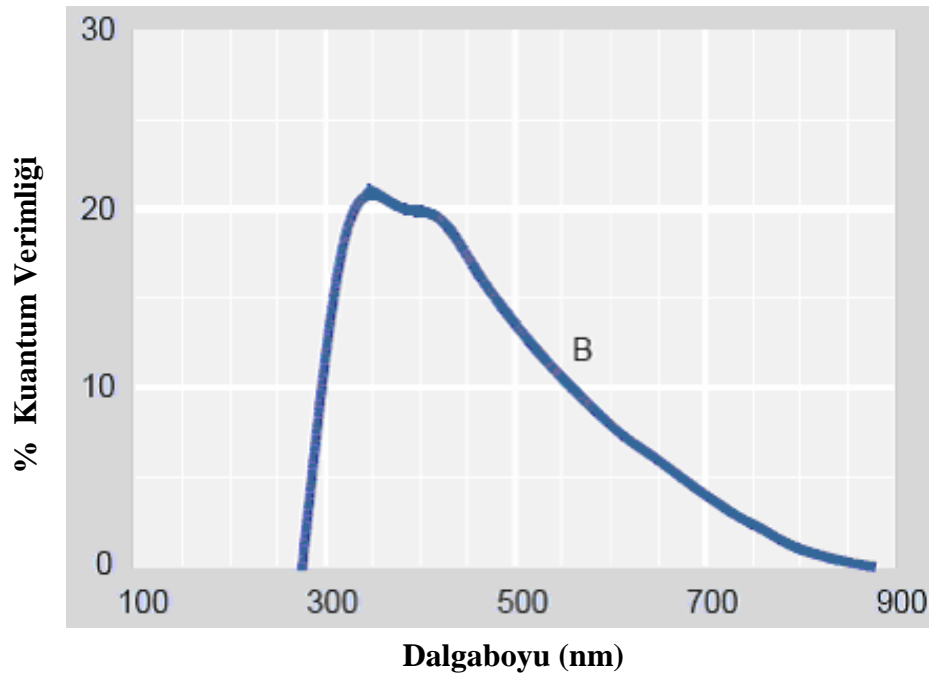
merkezde ise optik çözünürlüğün maksimum seviyede olması için küresel ve toroidal iki ayna ve kırınım ağı bulunur. Optik kısımlar, özellikle mor-ötesi ışınların iletilme veriminin en üst seviyeye çıkarılması için alüminyum ve magnezyum florür film kaplamalıdır. Ölçülmek istenilen dalgaboyu bandına uygun olarak dört farklı kırınım ağının seçime göre kullanılmasına imkan veren taret sistemi bulunmaktadır. Kırınım ağının boyutları 5x5 cm'dir. Kırınım ağları, çizgili ve holografik olmak üzere iki temel yapıda düz veya konkav alttaşlar üzerinde üretilebilmektedirler. Genellikle yüksek çözünürlük gerektiren sistemlerde çizgili kırınım ağları tercih edilmektedir (Newport, 2006/07).

### **3.4.7. Foto-çoklayıcı**

Monokromatörden çıkan ışık Elektron Tubes model foto-çoklayıcı ile ölçülmüştür. Foto-çoklayıcı; floresans, fotolüminesans... spektroskopileri gibi ölçüm sistemlerinde çok az yoğunluktaki elektromanyetik radyasyonun ölçülmesi için kullanılır. Bu foto-çoklayıcı; elektrostatik kalkanlı, termoelektrik etkili (Peltier türü) soğutuculu CDM30 model detektör modülü ve 9130/350SB03 model foto-çoklayıcı detektörden oluşmaktadır. Termoelektrik soğutma, sıcaklık farklarının etkisiyle elektrik potansiyel farkı oluşturulması ve bunun tam tersi olarak da potansiyel farkı uygulanması sonucunda sıcaklık farkının oluşturulması prensibine göre gerçekleşir. Atomik boyutlarda sıcaklık farkı, yük taşıyıcılarının sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket etmelerine sebep olur. Bu etki sayesinde elektrik üretilebildiği gibi mekanizma tersine çevrildiğinde cisimlerin sıcaklıkları da değiştirilebilmektedir. Foto-çoklayıcı detektör modülü, çevresi termal olarak yalıtılmış ve içi vakumlanmış bir tüptür (Şekil 3.11). Gelen ışınlar, tüpün girişinde bulunan foto-katottan fotoelektrik etki ile elektronların yayılmasına neden olurlar. Tüpün içinde sıralanmış çok sayıda dinod (Dynode) diye adlandırılan elektrotlar bulunur. Bu elektrotlar pozitif potansiyelle yüklenmişlerdir. Foto-katotta oluşan foto-elektronlar, berilyum bakır (BeCu) dinodlar tarafından hızlandırılır ve her bir dinoda çarptıklarında daha fazla sayıda foto-elektron oluşmasına sebep olurlar. Böylece düşük yoğunlukta olan ışık sinyali yükseltılarak tüpün sonundaki anot tarafından elektrik sinyaline dönüştürülmüş olur. Foto-çoklayıcı elektromanyetik spektrumun yaklaşık olarak 300 nm ile 800 nm arasındaki bölgesinde ölçüm yapabilmektedir (Şekil 3.12). Bu detektör Şekil 3.12'de belirtilen maksimum % 21'lik yüksek kuantum verimliği ile düşük fotolüminesans yoğunluğuna sahip amorf yarıiletkenlerin fotolüminesans ölçümleri için verimli bir detektördür (ET Enterprises, 2007, 2010).



Şekil 3.11. Foto-çoklayıcı detektör modülü.



Şekil 3.12. Tipik spektral tepki eğrileri.

### **3.4.8. Kilitlemeli Yükselteç**

Fotolüminesans spektrumu ölçümünde Stanford Research Systems (SRS) SR830 model kilitlemeli (lock-in) yükselteç kullanılmıştır. Kilitlemeli yükselteç, optik darbeleyici tarafından belirlenen referans frekansına kilitlenerek iç salınıcısı tarafından bu frekansa eş frekanslı sinyaller üreterek sadece bu frekanstaki sinyalleri dijital olarak işler ve ölçer. Dijital sinyal işlemcisi diğer sinyalleri 10 µs ile 30 ks aralığında zaman sabitiyle filtrelemeye imkan vermektedir. 10 MΩ giriş empedansına, 2 nV minimum voltaj ve 0.01°'lik faz hassasiyetine sahiptir. 1 Hz ile 102 kHz arasındaki frekanslarda 4 ½ hanelik çözünürlüğe sahip hem genliği hem de frekansı ayarlanabilen sinüs dalgaları üretebilmektedir. Buna ek olarak 50 (ya da 60) Hz ve 100 (ya da 120) Hz'lik gürültü sinyalleri için ayrı iki filtreye sahiptir. Ayrıca ±10 V'luk çıkış gerilimi de sağlayabilmektedir. RS-232 ve GPIB arayüzleri ile bilgisayar kontrolünde çalışabilmektedir.

### **3.4.9. Bilgisayar**

Fotolüminesans spektroskopi sisteminde monokromatör ve kilitlemeli yükselteç eşgüdümlü olarak Labview programı ile bilgisayar kontrolünde çalışmaktadır. Labview programında girilen ya da okunan veriler RS-232, GPIB (General Purpose Interface Bus) ve USB arayüzleri ile aktarılabilir. Ölçüm, veri kaydetme ve işleme de kullanılan Labview programı grafik tabanlı bir programlama yazılımıdır. Labview programı arayüzü; ön panel ve blok diyagramı olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Ön panel, programı kontrol eden kişinin ölçüm parametrelerini programa girmesini ve elde edilen verileri görmesini sağlar. Blok diyagramı ise işlem komutlarının programa yazıldığı bölümdür (Labview User Manuals, 2003; John ve Steve, 2003). Fotolüminesans spektrumu ölçümlerinde tüm optik ayarlar yapıldıktan ve ölçüm sıcaklığı ayarlandıktan sonra Labview programı kullanılarak önce ölçülmek istenilen dalgaboyu aralığı minimum ve maksimum dalgaboyları girilerek belirlenir. İkinci olarak ardışık dalgaboyu aralığı belirlenir. Üçüncü sırada kilitlemeli yükseltecin her bir ölçümü kaç kez yapacağı belirlenir ve son olarak ölçülen verilerin kaydedileceği dosya belirlenir. Program başlatıldığında bilgisayar monokromatörü sıfır konumuna getirir ve sonrasında başlangıç dalgaboyuna ayarlar. Bu süre boyunca lazer ışığından foto-çoklayıcıyı korumak için filtre tekeri monokromatörün girişini kapalı konumda tutar. Sonrasında filtre tekeri uygun filtreye geçer ve ölçüm başlar. Her bir dalgaboyu için kilitlemeli yükselteç istenilen sayıda ölçüm yapar ve verilerin



ortalamasını alıp bilgisayara gönderir. Bilgisayar verileri ve dalgaboyunu kaydederken, ölçüm sırasında deneyin takip edilebilmesi için grafiğini de monitörde çizdirir. Son ölçümden sonra program sonlanır.

## BÖLÜM 4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Giriş

Dört farklı gaz konsantrasyonunda ( $M=(C_2H_4/(SiH_4+ C_2H_4))$ ),  $30 \text{ mW/cm}^2$  düşük güç (DG) ve  $90 \text{ mW/cm}^2$  yüksek güç (YG) yoğunluğunda büyütülmüş olan toplam sekiz çeşit a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans spektroskopisi ölçümleri ve analizleri bu tez kapsamında kurulan fotoluminesans spektroskopisi ölçüm sistemi ile yapılmıştır. Filmlerin fotoluminesans spektrumlarının analizleri, filmlerin enerji bant yapıları ve ışınım mekanizmaları hakkında önemli bilgiler vermektedir. Filmlerin karbon içerikleri, optik enerjileri ve Urbach enerjileri bu analizlere önemli katkılar sağlamaktadır. Bu sebeple bu çalışmadan önce X-ışını foto-elektron spektroskopisi ölçümleri ile belirlenmiş olan karbon içerikleri ve morötesi-görünür bölge geçirgenlik (UV-Visible) spektroskopisi ölçümleri ile belirlenmiş olan optik enerjileri ve Urbach enerjileri çok kısa bir şekilde özetlenerek, sunulmuştur (Akaoglu, 2004; Sel, 2007; Akaoglu ve ark., 2008).

### 4.2. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri

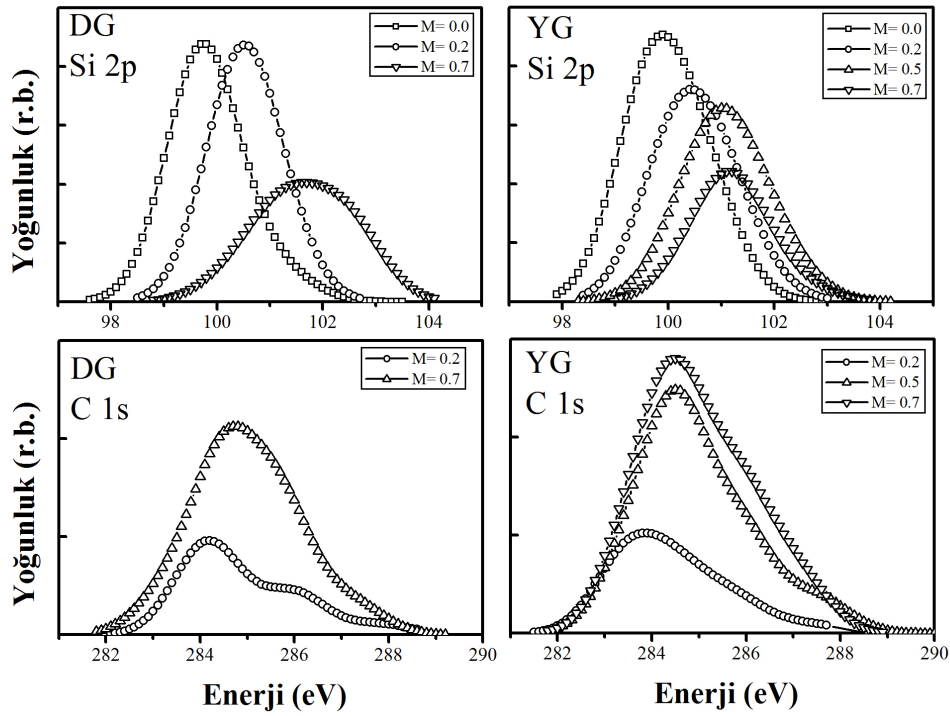
a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin, genel olarak iki pikten oluşan X-ışını foto-elektron spektroskopisi Şekil 4.1’de verilmiştir. Birinci pik 99 eV civarında olan Si 2p piki; ikinci pik ise 284.5 eV civarında olan C 1s pikidir (XPS Handbook, 1992). Yükleme etkisinin ortadan kaldırılması amacıyla 284.5 eV’luk C 1s enerji seviyesi referans olarak alınmıştır. Filmlerin karbon içerikleri:

$$x = \left( \frac{I_n}{S_n} \right) / \sum_{n=1}^N \left( \frac{I_n}{S_n} \right) \quad (4.1)$$

formülüne göre hesaplanmıştır (XPS Handbook, 1992). Burada; ‘x’ karbon içeriği, ‘I<sub>n</sub>’ spektrumda elemente ait pikin alanı, ‘S<sub>n</sub>’ hassasiyet faktörüdür ve karbon için 0.25, silisyum için 0.27 olarak alınmıştır (Briggs, 1990). Filmlerin karbon içerikleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur (Sel, 2007).

Şekil 4.1’de YG ve DG filmler için M arttıkça, göreceli olarak C 1s pikinin yoğunluğunun arttığı, buna karşın Si 2p pikinin yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Bu gözleme göre x arttıkça Si-Si bağlarının yerini Si-C ve C-C bağları almaktadır. Buna ek

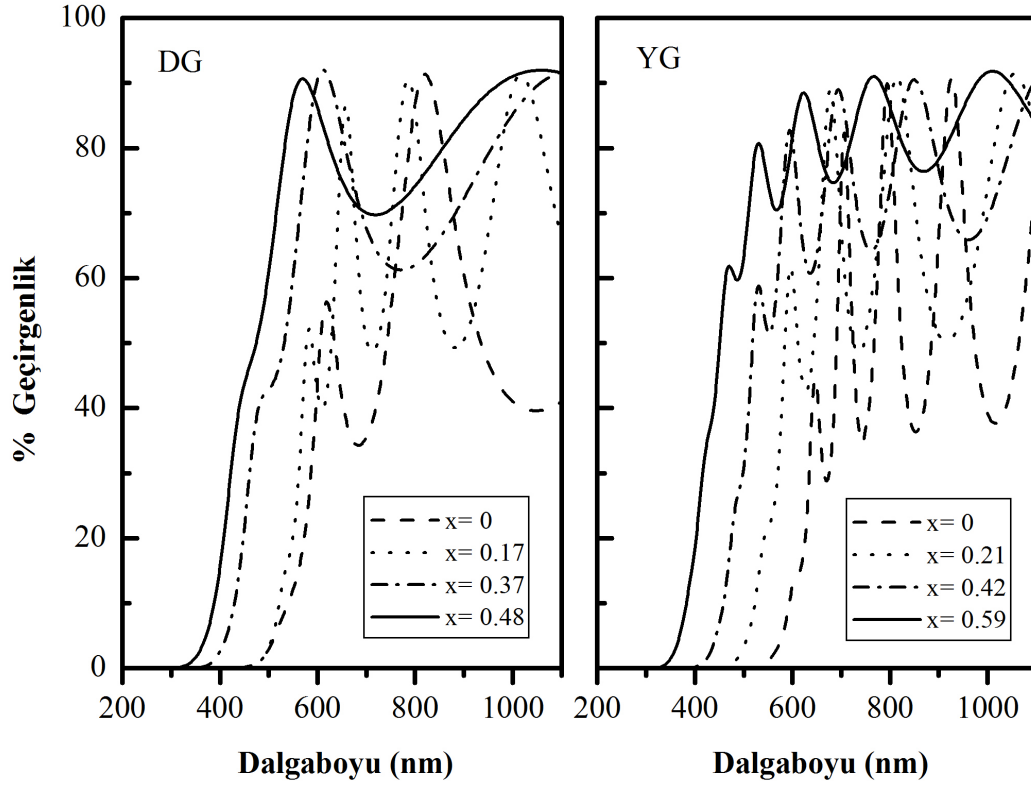
olarak XPS piklerinin yoğunluğundaki göreceli değişim YG filmlerde, DG filmlere kıyasla daha fazla olmaktadır. Bir başka ifade ile güç yoğunluğu arttığında filmlerin yapısına daha fazla karbon katılabilmektedir. Çizelge 4.1’de karbon içeriğinin DG filmler için 0.00-0.48 ve YG filmler için 0.00-0.59 aralığında olduğu görülmektedir. Bu değerler, filmlerin özelliklerine karbon içeriğinin etkilerinin incelenebilmesi için yeterlidir.



Şekil 4.1. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin Si 2p ve C 1s enerji seviyelerindeki XPS spektrumu (Sel, 2007).

### 4.3. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri

a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektrumları Şekil 4.2’de sunulmuştur (Akaoglu, 2004; Akaoglu ve ark., 2008). Geçirgenlik spektrumları OptiChar optik karakterizasyon yazılımı ve ayrıca Swanepoel metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen soğurma katsayıları ( $\alpha$ ) kullanılarak filmlerin kalınlık, optik enerjileri ve Urbach enerjileri ( $E_U$ ) hesaplanmıştır. Tauc enerjisi ( $E_{Tauc}$ ),  $\sqrt{h\nu\alpha}$ ’nın,  $h\nu$ ’ye dik grafiğine uydurulan doğrusal fonksiyonun sıfırı kestiği ( $\sqrt{h\nu\alpha} = 0$ ) değerden hesaplanmıştır. Optik enerjinin bir başka ifadesi olarak,  $E_{04}$  soğurma katsayısının  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  olduğu enerji değeridir. Urbach enerjisi,  $\ln\alpha$  dik  $h\nu$  grafiğinin eğiminin tersinden hesaplanmıştır. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin kalınlıkları,  $E_{Tauc}$ ,  $E_{04}$  optik enerjileri ve  $E_U$  değerleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.2. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin UV-Visible spektrumu (Akaoğlu, 2004; Sel, 2007; Akaoğlu ve ark., 2008).

Çizelge 4.1. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin XPS ve UV-Visible spektroskopisi analizleri ile belirlenen karbon içeriği (x), film kalınlıkları, E<sub>04</sub>, E<sub>Tauc</sub> ve E<sub>U</sub> değerleri (Akaoğlu, 2004; Sel, 2007; Akaoğlu ve ark., 2008).

	DG (30 mW/cm <sup>2</sup> )				YG (90 mW/cm <sup>2</sup> )			
<b>Gaz Konsantrasyonu (M)</b>	0.0	0.2	0.5	0.7	0.0	0.2	0.5	0.7
<b>Karbon İçeriği (x)</b>	0.00	0.17	0.37*	0.48	0.00	0.21	0.42	0.59
<b>Film Kalınlığı (nm)</b>	226.5	523.4	230.7	240.8	642.0	548.2	713.6	748.9
<b>E<sub>04</sub> (eV)</b>	2.00	2.18	2.42	2.60	1.96	2.18	2.48	2.91
<b>E<sub>Tauc</sub> (eV)</b>	1.99	2.03	2.40	2.55	1.89	2.03	2.28	2.71
<b>E<sub>U</sub> (meV)</b>	41.9	96.2	113.1	118.9	68.7	80.8	169.9	264.8

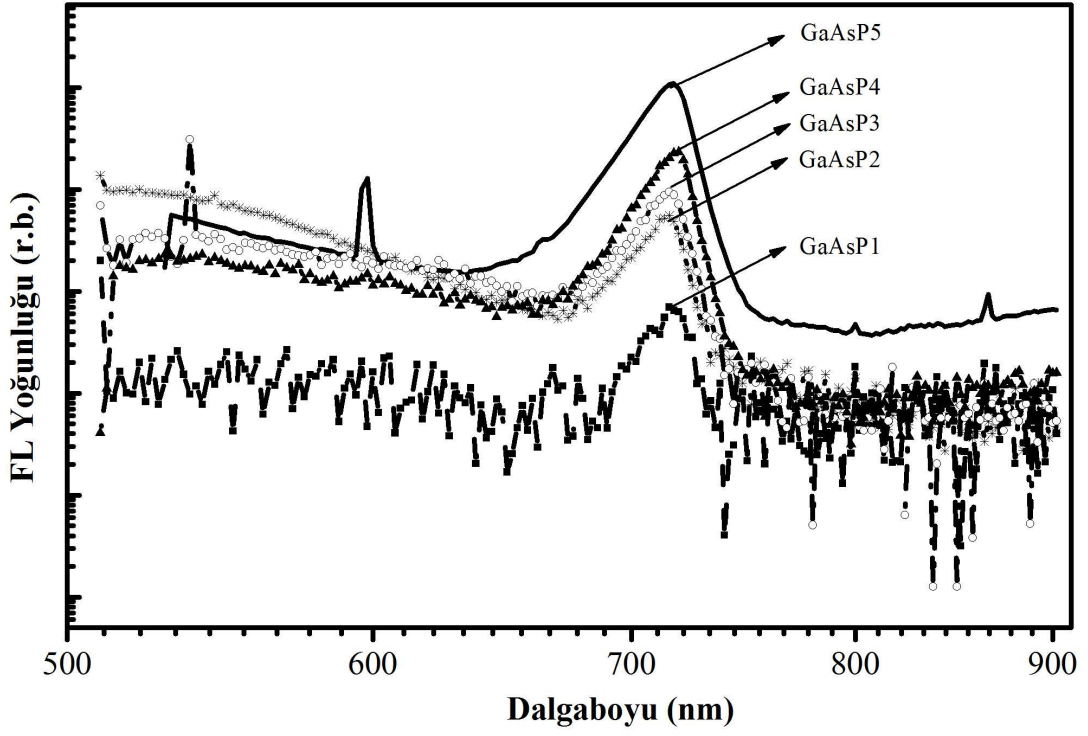
\*M=0.5 DG film için, karbon içeriği XPS ile belirlenememiştir. Literatürde bulunan optik sabitler ile karşılaştırılarak istatistiksel yaklaşımla 0.32<x<0.40 arasında belirlenmiştir. Ortalama olarak x=0.37 alınmıştır.

Karbon içeriği arttıkça optik enerjilerinin arttığı gözlemlenmiştir. Dahası, aynı M değerleri için bu artış YG filmlerde DG filmlere kıyasla daha fazla olmuştur. Bunun sebebi, karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak daha güçlü olan Si-C bağlarının yoğunluğunun artmasıdır (Robertson, 1992a,b). Diğer yandan, yapının düzensizliğinin bir ölçüsü olarak  $E_U$ , YG filmlerde DG filmlere kıyasla yaklaşık iki katı daha fazladır ve karbon içeriği ile artmıştır.

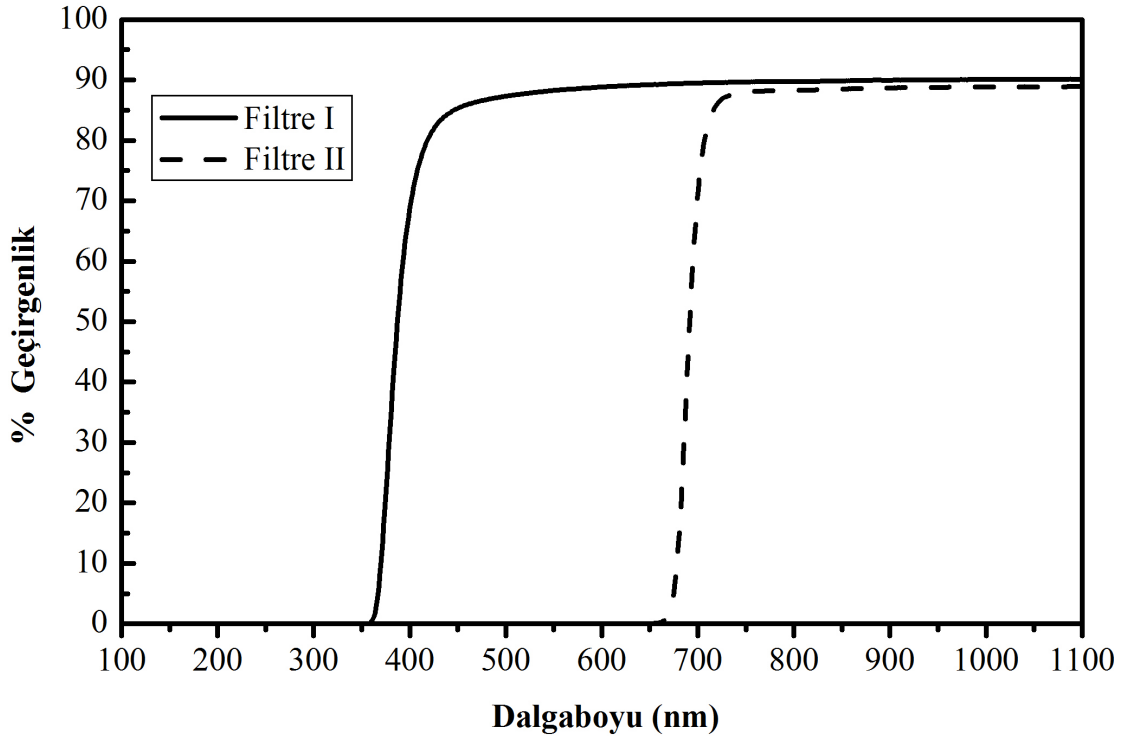
#### **4.4. Fotolüminesans Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri**

a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotolüminesans spektrumu ölçümleri bu tez kapsamında kurulumu ve optimizasyonu gerçekleştirilmiş olan fotolüminesans spektroskopisi sistemi ile yapılmıştır. Bu sistemde uyarıcı ışık kaynağı olarak, a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin optik enerjilerine uygun olacak şekilde Ar iyon lazerinin 457.9 nm, 465.8 nm, 476 nm ve 488 nm'lik ışınları kullanılmıştır. Oda sıcaklığında amorf malzemelerin fotolüminesans yoğunlukları kristallere göre daha az olabildikleri için ölçüm sisteminin kurulumu ve ilk sinyalin ölçümü galyum arsenid fosfat (GaAsP) kristal örnek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece mercek, ayna, filtre... gibi optik bileşenlerin konumları ve açısal ayarlamaları fotolüminesans sinyallerinin ölçülmesine en üst verimde imkan verecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.3'te kristal GaAsP'nin fotolüminesans spektrumu verilmiştir. Yaklaşık 722 nm'deki pik kristal GaAsP'nin oda sıcaklığındaki fotolüminesans pikidir. Bu şekilde optik bileşenlerin konum ve açılarının ayarlanması neticesinde gürültü sinyallerinin seviyesindeki fotolüminesans sinyal seviyesinin yaklaşık 100 kat arttırıldığı gözlemlenmektedir. Bu artış, fotolüminesans spektrumu ölçümlerinin çok hassas ayarlama gerektirdiğini göstermektedir.

Ölçümlerde filtre tekerinde kullanılan iki adet yüksek geçirgen filtrenin (filtre-I ve filtre-II) geçirgenlik spektrumları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Monokromatör, 400 nm'nin üstündeki dalgaboylarına geçtiğinde otomatik olarak devreye giren filtre-I 400 nm'nin altındaki dalgaboylarındaki ışınları keserek ikinci merteye kırınımların kırınım ağında oluşmasını önlemektedir. Aynı şekilde 700 nm'de devreye giren filtre-II 700 nm'ye kadar olan ışınların ikinci ve üçüncü merteye kırınımlarını önlemektedir. Eğer bu filtreler kullanılsaydı, bantlarda oluşan fotolüminesans pikleri ile yüksek merteye ışınlar spektrumunda üst üste gelir ve bir süperpozisyon oluşurdu.

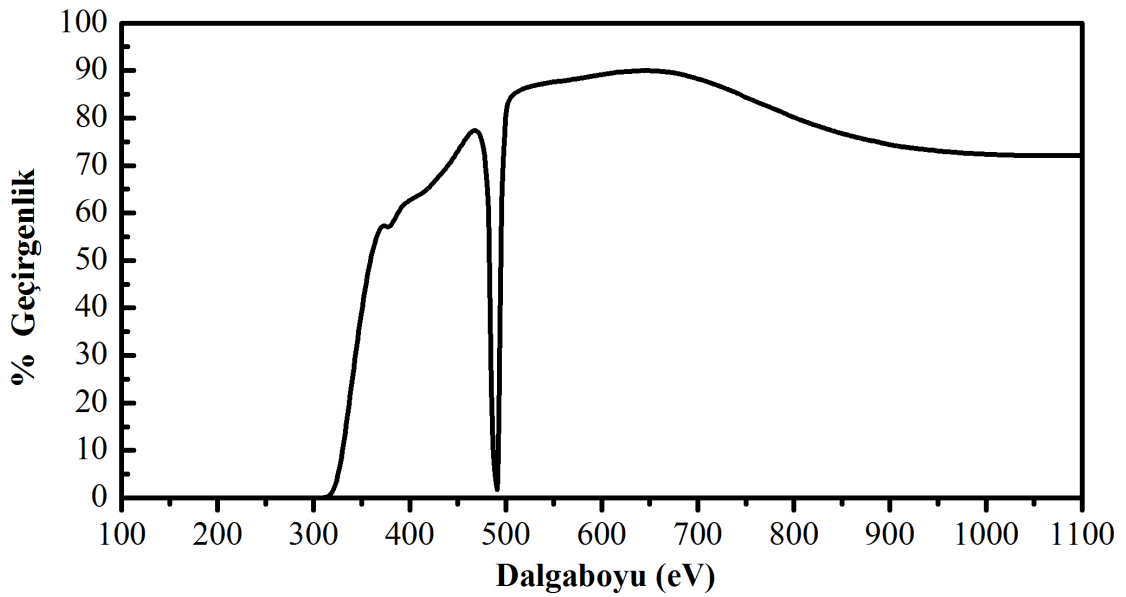


Şekil 4.3. Fotolüminesans spektroskopisi sisteminin optik bileşenlerinin konum ve açılarının farklı ayarlarında ölçülmüş kristal GaAsP örneğinin fotolüminesans spektrumu.

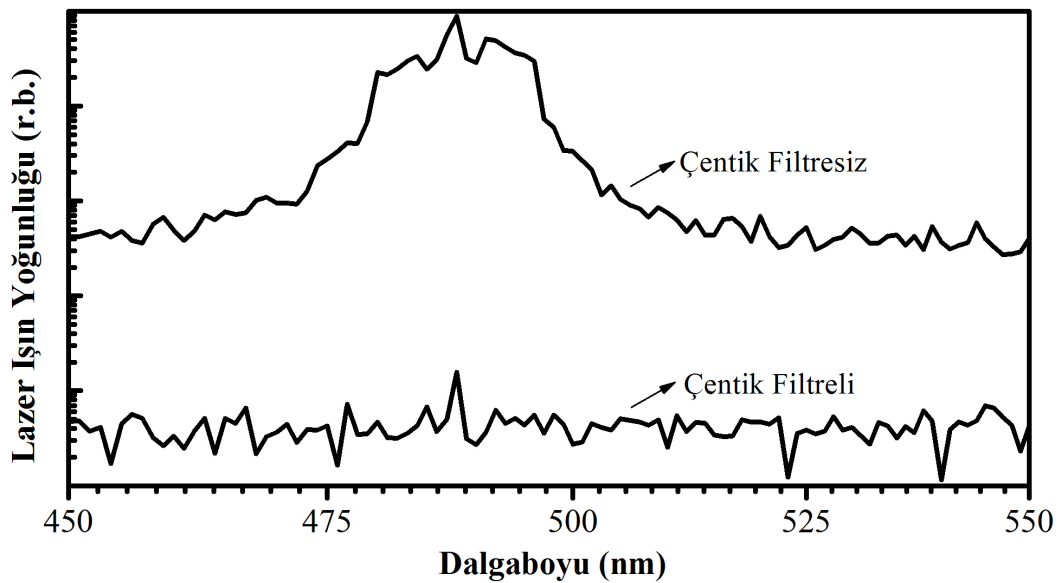


Şekil 4.4. Filtre tekerinde kullanılan 2 adet filtrenin (Filtre-I ve Filtre-II) geçirgenlik spektrumu.

Lazer ışınının örneğin yüzey normaline mümkün olduğunca büyük açı ile gelecek şekilde ayarlanması sonucunda monokromatöre minimum yoğunlukta ulaşması sağlanmıştır. Ancak örnek yüzeyinden az da olsa difüz ederek fotoluminesans ile beraber monokromatöre ulaşan lazer ışınlarının tamamen engellenmesi için çentik filtre kullanılmaktadır. 488 nm'lik çentik filtrenin geçirgenlik spektrumu Şekil 4.5'te sunulmuştur. Çentik filtrenin  $488 \pm 10$  nm bandını tamamen soğurduğu görülmektedir. Şekil 4.6'da ise çentik filtrenin 488 nm Ar iyon lazerinin ışmasını filtrelediği görülmektedir.

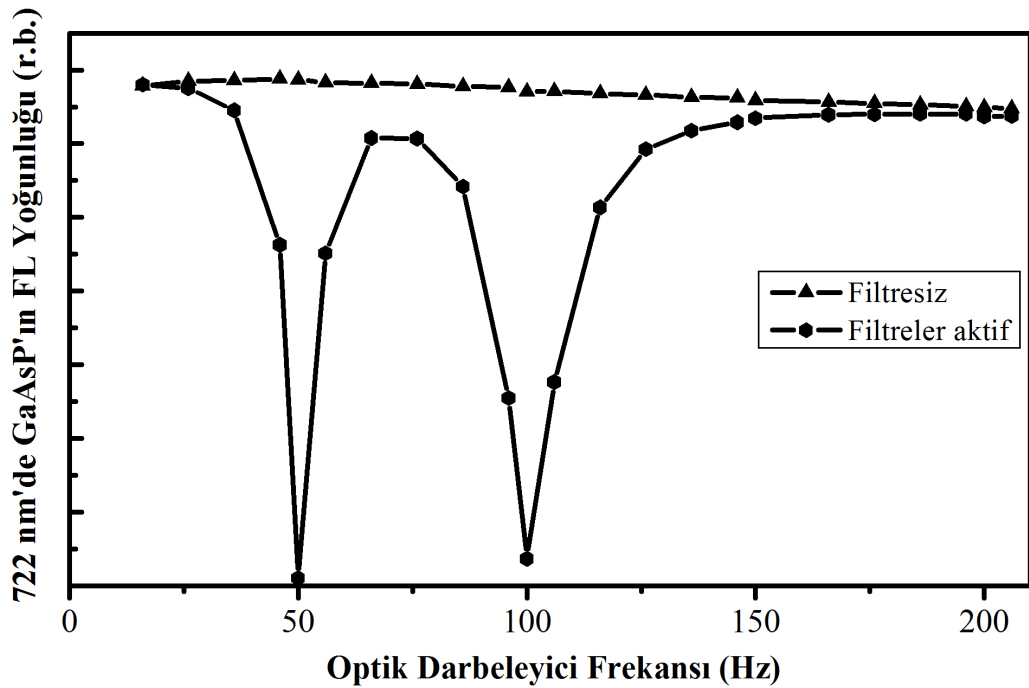


Şekil 4.5. Çentik filtrenin UV-Visible spektrumu.



Şekil 4.6. 488 nm lazer ışınının çentik filtre ve çentik filtresiz ölçülmüş spektrumu.

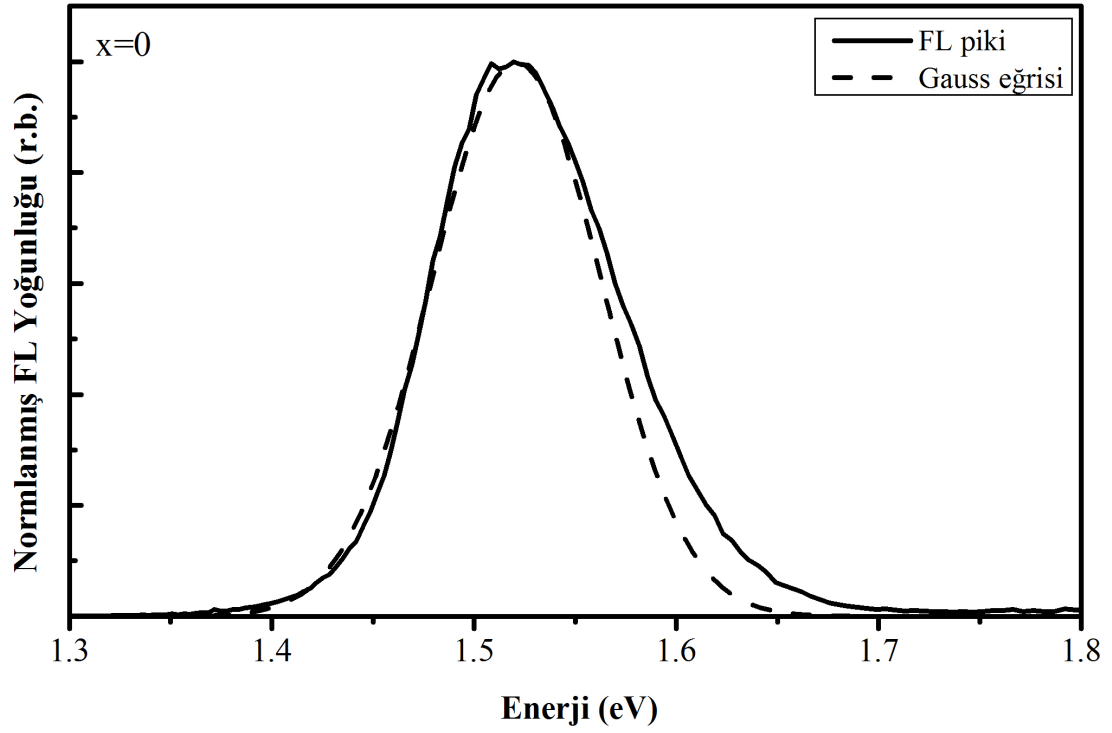
Çok düşük seviyeli sinyallerin ölçülebilmesinde optik darbeleyici ile beraber kullanılan kilitlemeli yükseltecin 15 Hz'ten 200 Hz'e kadar olan optik darbeleyici frekanslarına duyarlılığı incelenmiştir. Bu amaçla monokromatör, kristal GaAsP'nin fotoluminesans spektrumunun yaklaşık maksimumu olan 722 nm'ye ayarlandıktan sonra gelen ışığın yoğunluğu sabit tutularak optik darbeleyicinin frekansı 10'ar Hz'lik basamaklarla arttırılmış ve her bir frekansta gelen ışığın yoğunluğu kilitlemeli yükselteç ile ölçülmüştür. Şekil 4.7'de farklı frekanslarda ölçümlerin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Kilitlemeli yükseltecin sahip olduğu 50 Hz ve 100 Hz filtreleri aktif duruma getirildiğinde ise bu frekanslardaki sinyallerin filtrelendiği gözlemlenmiştir.



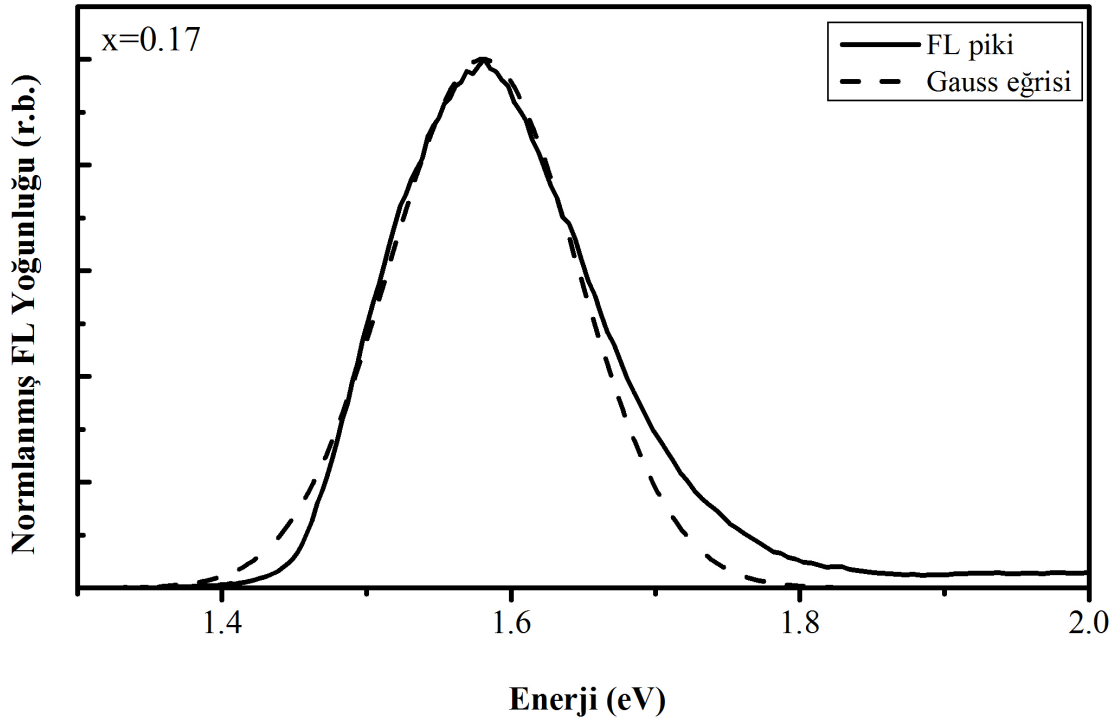
Şekil 4.7. Kristal GaAsP'nin fotoluminesans maksimumu olan 722 nm'ye ayarlı monokromatör ile kilitlemeli yükseltecin ölçtüğü ışık yoğunluğunun, 50 Hz ve 100 Hz'lik filtreler devre dışı ve aktif durumda iken optik darbeleyicinin frekansına bağımlılığı.

Fotoluminesans spektroskopisi sisteminin kurulumu ve optimizasyonu tamamlandıktan sonra a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin oda sıcaklığında (300 K) fotoluminesans spektrumları ölçülmüştür. Ayrıca, x=0.42 ve x=0.48 filmlerin çeşitli sıcaklıklarda da fotoluminesans spektrumları ölçülmüştür. Oda sıcaklığında ölçülen fotoluminesans spektrumları normlanmış ve PeakFit programı ile Gauss fonksiyonuna uydurulmuştur. x=0'dan başlamak üzere DG ve YG filmler için fotoluminesans spektrumlarının grafikleri sırasıyla çizdirilmiştir.

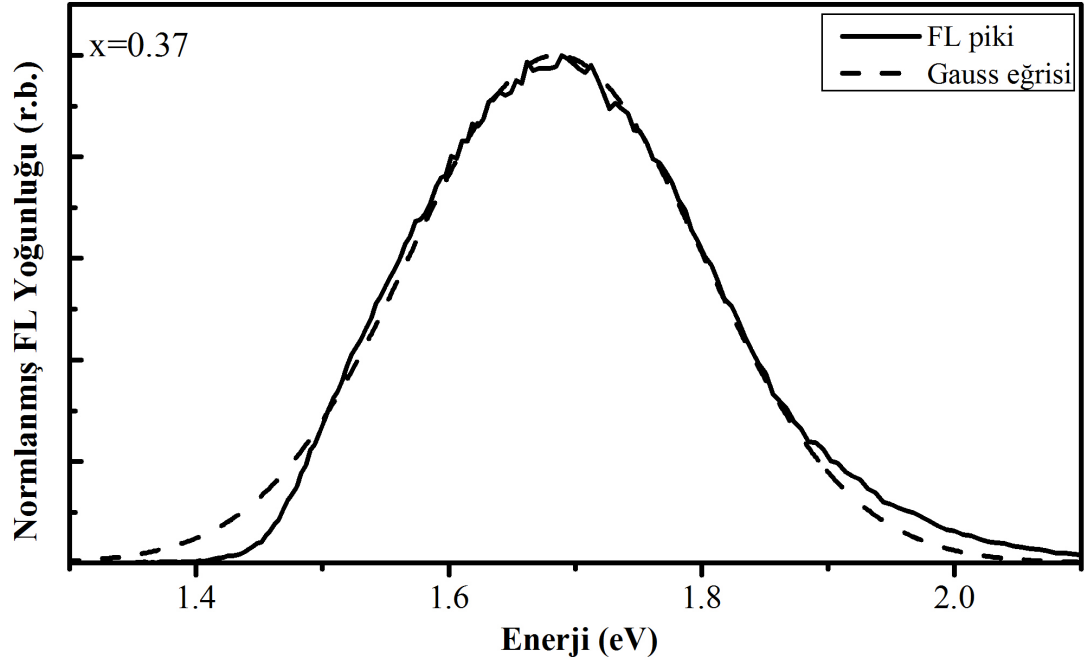




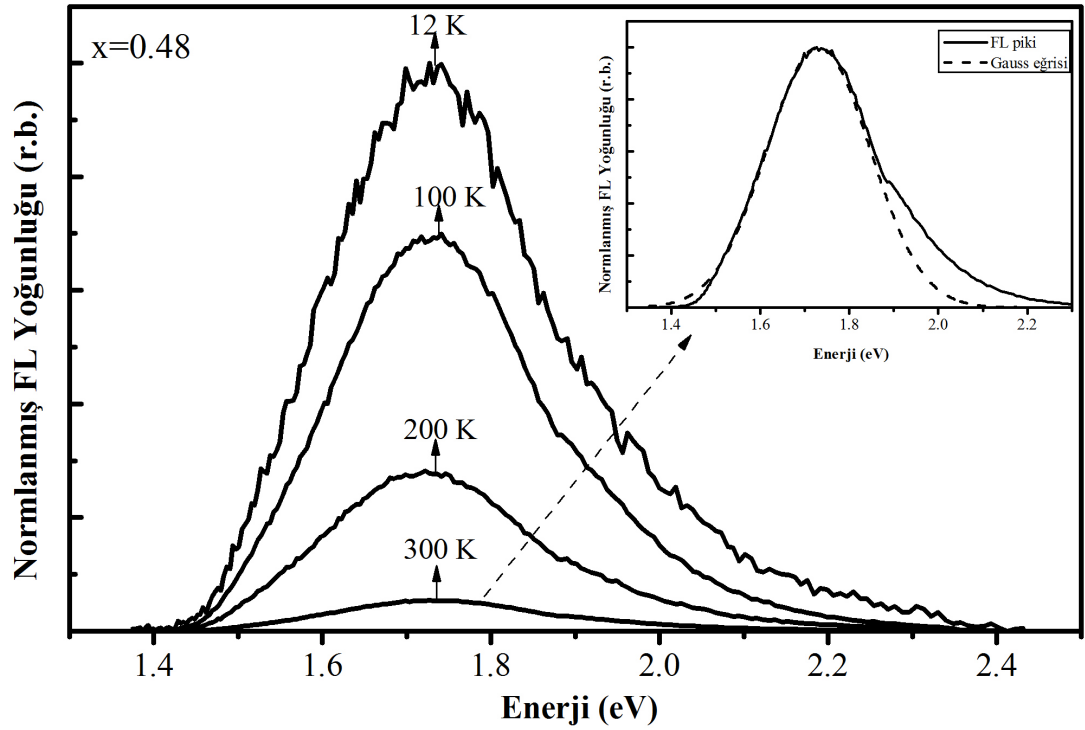
Şekil 4.8. DG,  $x=0$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



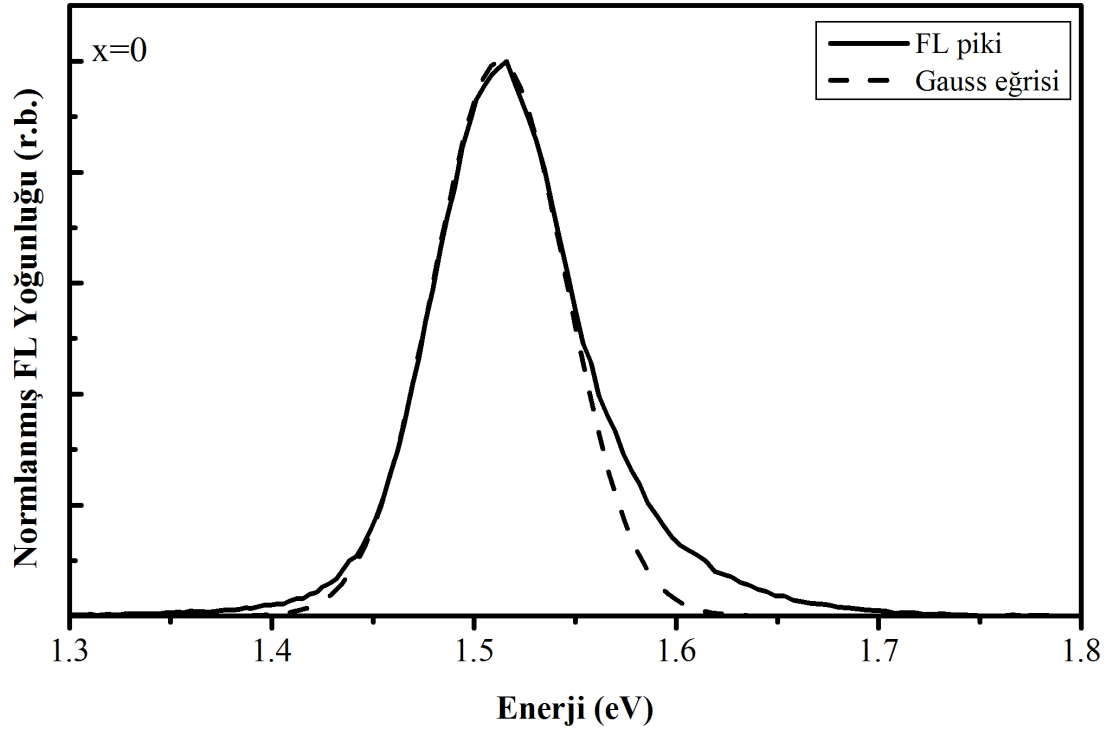
Şekil 4.9. DG,  $x=0.17$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



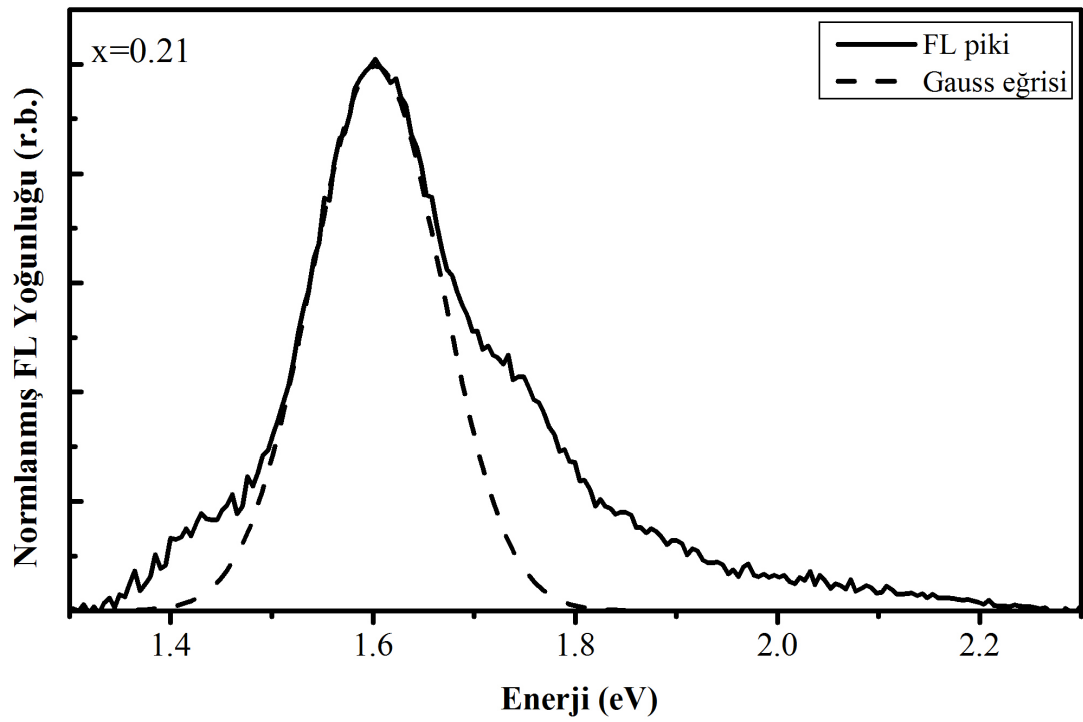
Şekil 4.10. DG,  $x=0.37$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



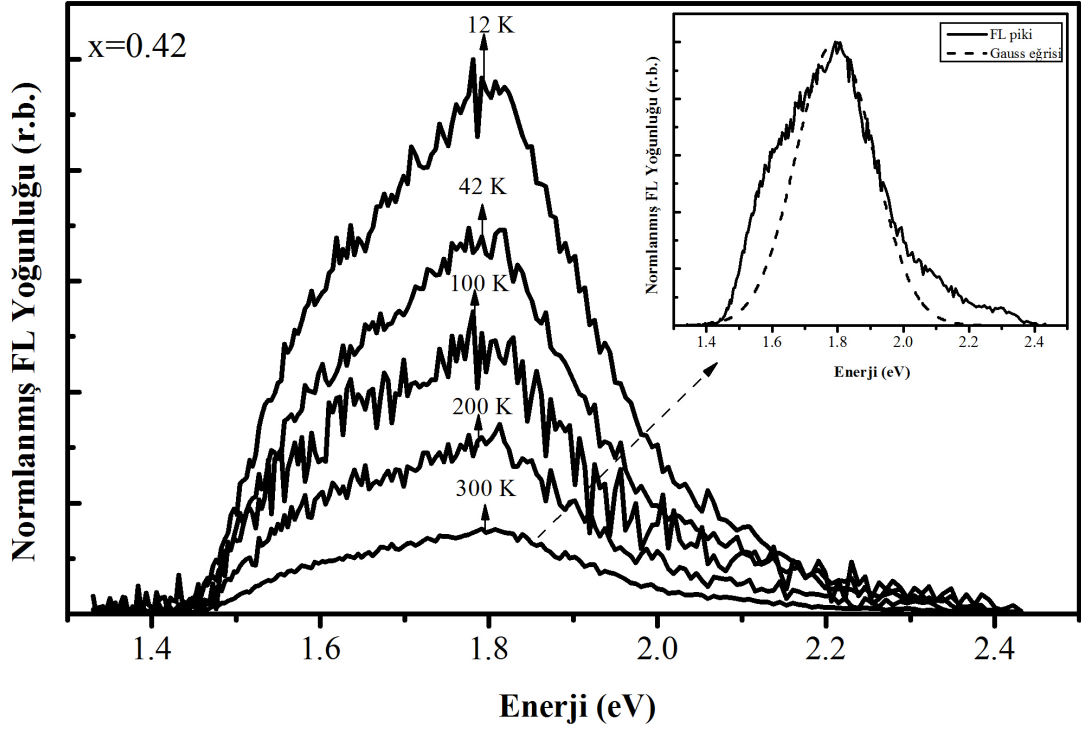
Şekil 4.11. DG,  $x=0.48$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin çeşitli sıcaklıklarda ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumları ve oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



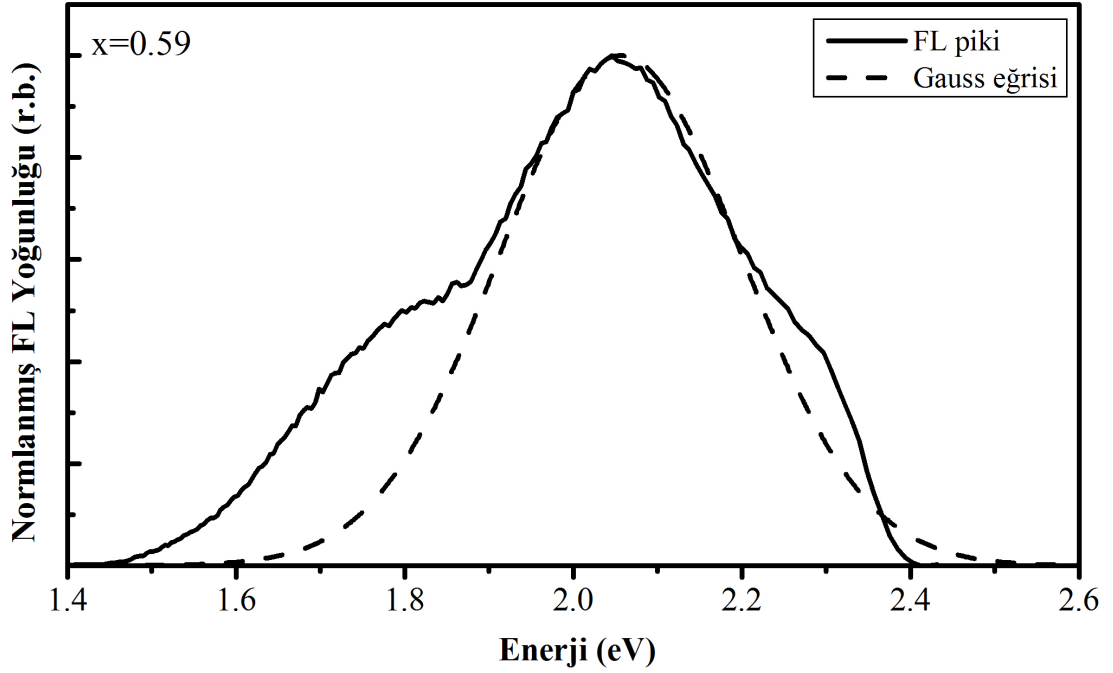
Şekil 4.12. YG,  $x=0$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



Şekil 4.13. YG,  $x=0.21$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



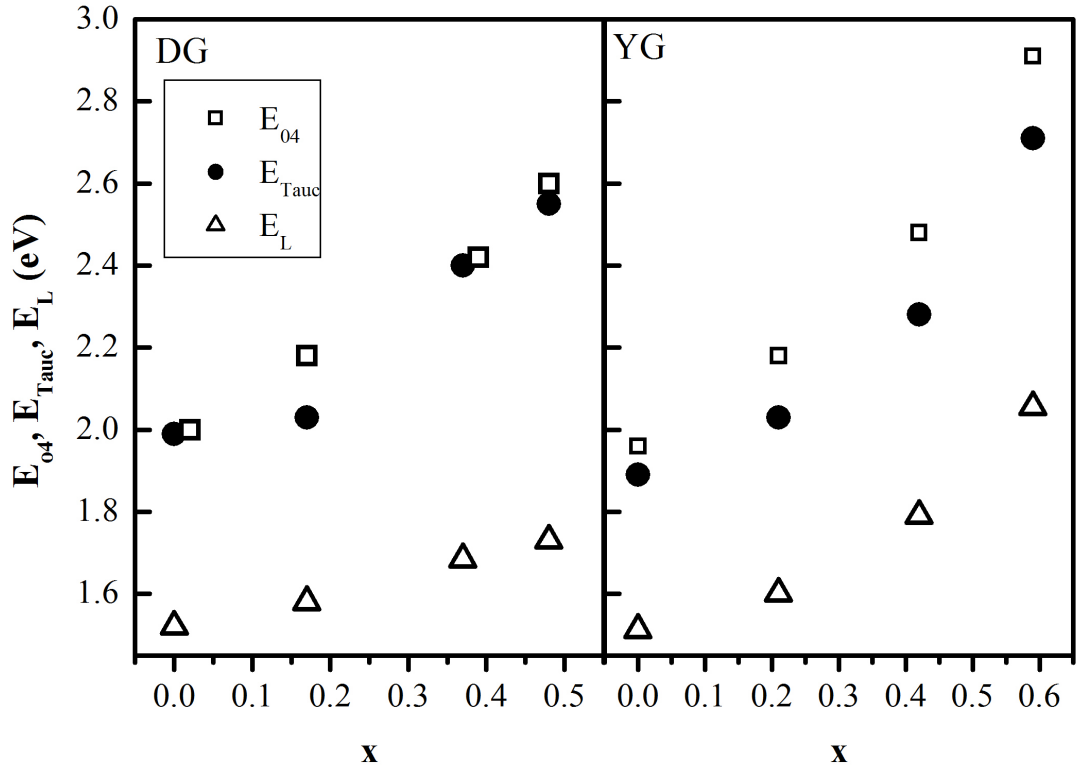
Şekil 4.14. YG,  $x=0.42$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin çeşitli sıcaklıklarda ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumları ve oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.



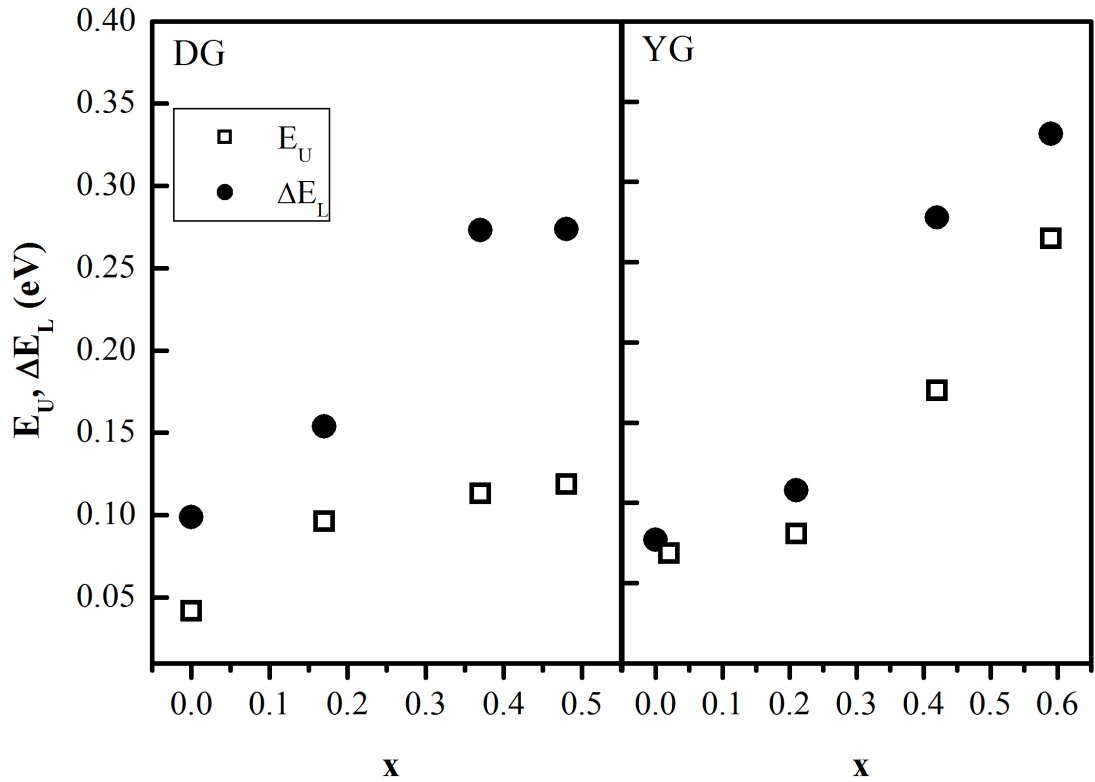
Şekil 4.15. YG,  $x=0.59$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi.

Karbon içeriğinin artması ile fotoluminesans spektrumlarının yüksek enerjilere doğru kaydığı ve genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. DG,  $x=0.48$  filmi için 12 K, 100 K, 200 K ve 300 K'de ve YG,  $x=0.42$  filmi için 12 K, 42 K, 100 K, 200 K ve 300 K'de fotoluminesans spektrumları ölçülmüştür. Artan sıcaklıkla genel olarak fotoluminesans spektrumlarının şekillerinin değişmediği ancak fotoluminesans yoğunluklarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Oda sıcaklığı fotoluminesans spektrumlarının maksimumlarının enerjileri ( $E_L$ ) ve tam genişlik yarı maksimumları ( $\Delta E_L$ ), uydurulan Gauss eğrileri yardımıyla belirlenmiştir.  $E_L$ , DG filmlerde 1.52-1.73 eV; YG filmlerde ise 1.51-2.05 eV aralığında bulunmuştur.  $\Delta E_L$ , DG filmlerde 0.09-0.27 eV; YG filmlerde ise 0.07-0.33 eV aralığında değişmiştir. Şekil 4.16'da  $E_L$ ,  $E_{Tauc}$  ve  $E_{04}$  enerjileri,  $x$ 'in fonksiyonu olarak DG ve YG filmler için çizdirilmiştir. Şekil 4.17'de ise  $E_U$  ve  $\Delta E_L$ ,  $x$ 'in fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Aralarında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bunun genel olarak, daha güçlü olan Si-C ve C-C bağlarının, yapıdaki Si-Si bağlarının yerini almasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna ek olarak, karbon içeriğinin ve güç yoğunluğunun artmasına bağlı olarak  $\Delta E_L$  ve  $E_U$ 'daki artış, yapıdaki düzensizliğin arttığını göstermektedir. Ayrıca, karbon zengin filmlerde  $sp^2$  formasyonuna bağlı olarak  $\pi$  bağlarının yoğunluğunun artması da bu artışta etkilidir.  $x$ 'in bir fonksiyonu olarak, YG filmlerin  $E_L$  ve  $\Delta E_L$  değerlerinde DG filmlere kıyasla daha fazla artış gözlemlenmiştir. Bu güç yoğunluğunun artmasıyla yapıya daha fazla karbonun katılmasına bağlanabilir. Karbon içeriğine bağlı olarak  $E_U$  ve  $\Delta E_L$ 'deki artış; ışımali yeniden birleşmelerin yaygın bant durumlarından bant uzantılarına doğru termalizasyon sonucunda, iletim bant uzantı durumlarından değerlik bant uzantı durumlarına doğru gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

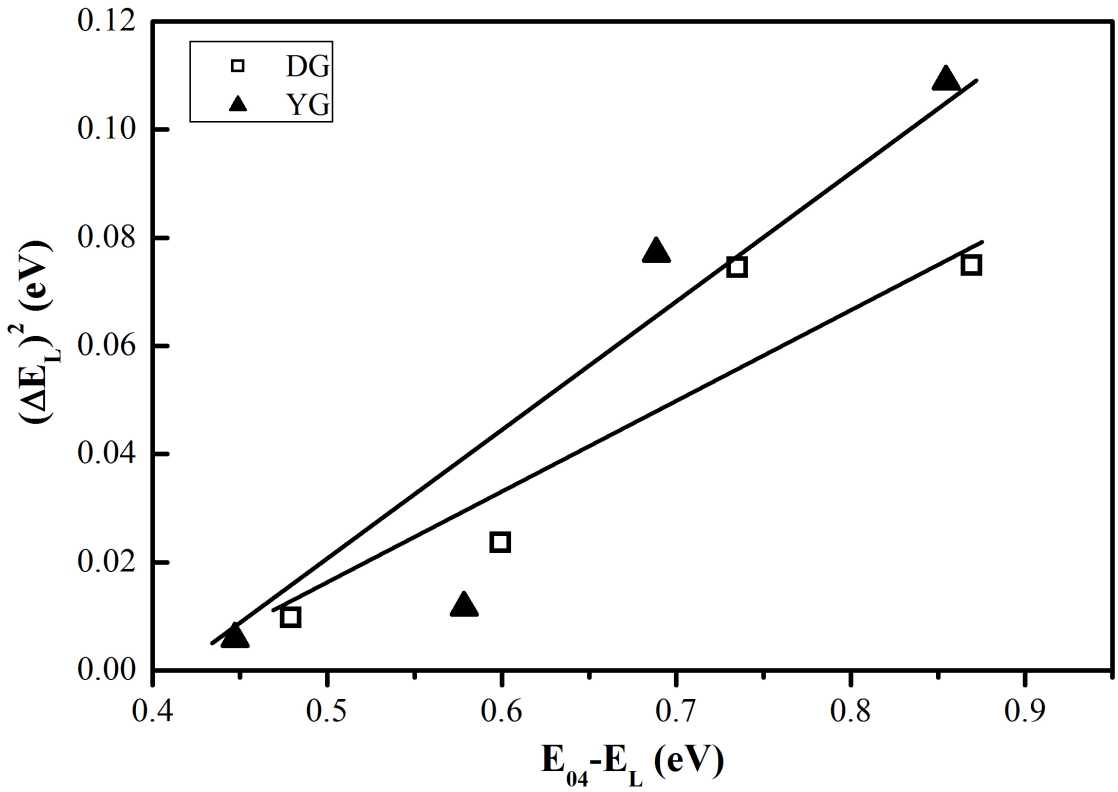


Şekil 4.16. DG ve YG a-Si<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>:H filmler için  $E_{04}$ ,  $E_{Tauc}$  ve  $E_L$ 'nin x'in fonksiyonu olarak grafiği.

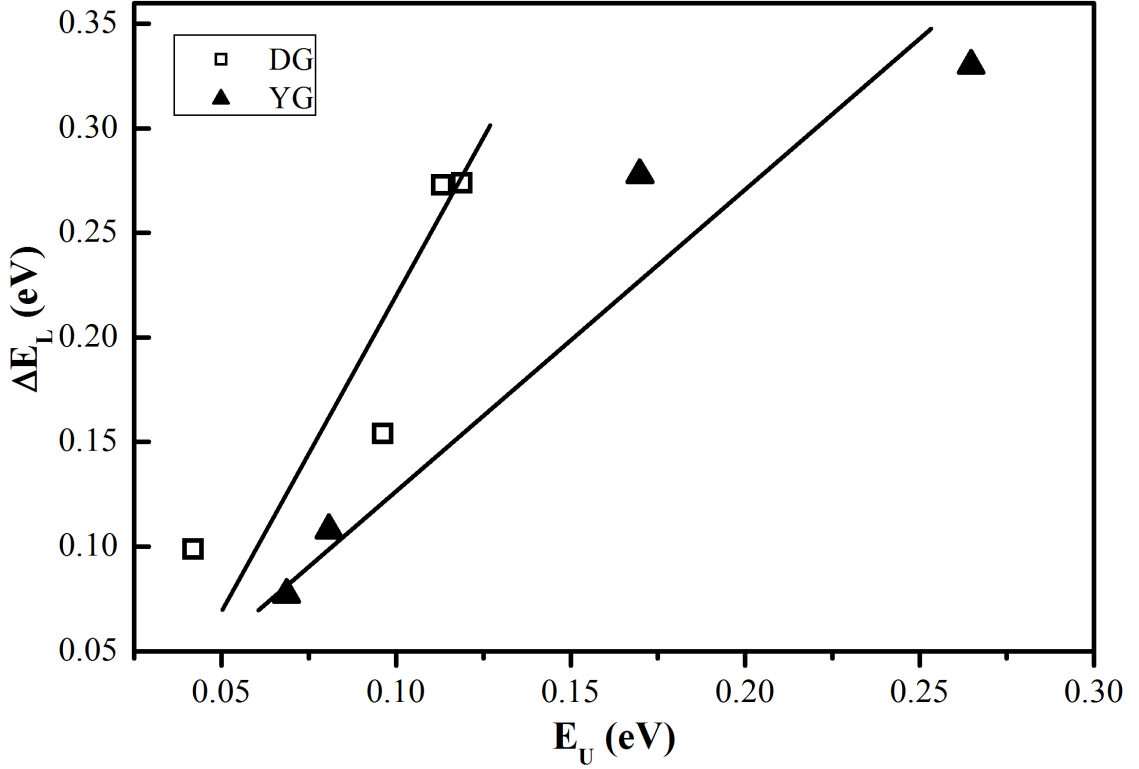


Şekil 4.17. DG ve YG a-Si<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>:H filmler için  $E_U$  ve  $\Delta E_L$ 'nin x'in fonksiyonu olarak grafiği.

Fotoluminesans ışına mekanizmaları Street'in önerdiği 'elektron-fonon çiftleşmesi modeli' ve Boulitrop ve Dunstan'ın önerdiği 'statik düzensizlik modeli' ışığında incelenmiştir (Street, 1991; Boulitrop ve Dunstan, 1983; Dunstan ve Boulitrop, 1984; Searle ve Jackson, 1989; R.Tessler ve Solomon, 1995). Bant uzantı durumlarının rasgele dağıldığı ve bu dağılımın enerjinin exponansiyel fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Ayrıca ışımsız ve ışıklı birleşme merkezlerinin arasındaki mesafenin yaklaşık olarak 12 nm olduğu varsayılmıştır. İki mekanizma birlikte de ışına mekanizmasını oluşturabilmektedirler. Bu durumda, bu iki mekanizmadan hangisinin baskın mekanizma olduğunun belirlenmesi amacıyla öncelikle  $(\Delta E_L)^2$  dik  $E_{04}-E_L$  grafiği çizilerek eğimi bulunmuştur (Şekil 4.18). Bu eğimden  $E_0$ , DG filmler için  $0.062 \pm 0.020$  eV ve YG filmler için  $0.091 \pm 0.020$  eV olarak hesaplanmıştır. Böylece elektron-fonon çiftleşmesi mekanizmasının tüm ışına mekanizmasına etkisi incelenmiştir. Sonrasında ise  $\Delta E_L$  dik  $E_U$  grafiği çizilerek, eğimi DG filmler için  $1.80 \pm 0.50$  ve YG filmler için  $2.29 \pm 0.40$  olarak bulunmuş ve böylece statik düzensizlik modelinin ışına mekanizmasına etkileri incelenmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.18. DG ve YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmler için  $(\Delta E_L)^2$ 'nin  $E_{04}-E_L$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği.



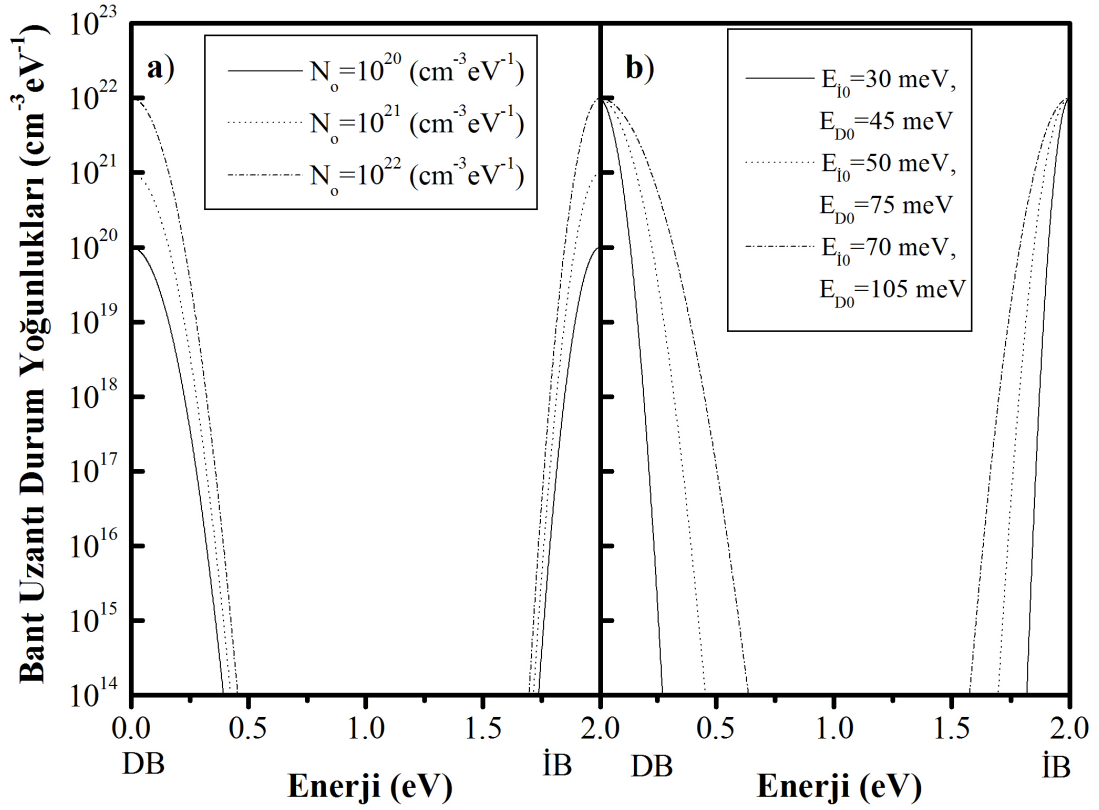
Şekil 4.19. DG ve YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmler için  $\Delta E_L$ 'nin  $E_U$ 'nun fonksiyonu olarak grafiği.

Birleşik durum yoğunluğu dağılımı kullanılarak oluşturulan ışıma modelinin incelenmesi için öncelikle iletim ve değerlik bant uzantısı durum yoğunlukları Bölüm 1.4.3'te verilen eşitlik 1.25 ve 1.26 kullanılarak hesaplanmıştır. Durum yoğunlukları  $N_0=N_{IB0}=N_{DB0}$  alınarak, farklı  $N_0$  değerleri için Şekil 4.20a'da ve farklı  $E_{IB0}$  ve  $E_{DB0}$  değerleri için ise Şekil 4.20b'de çizdirilmiştir.

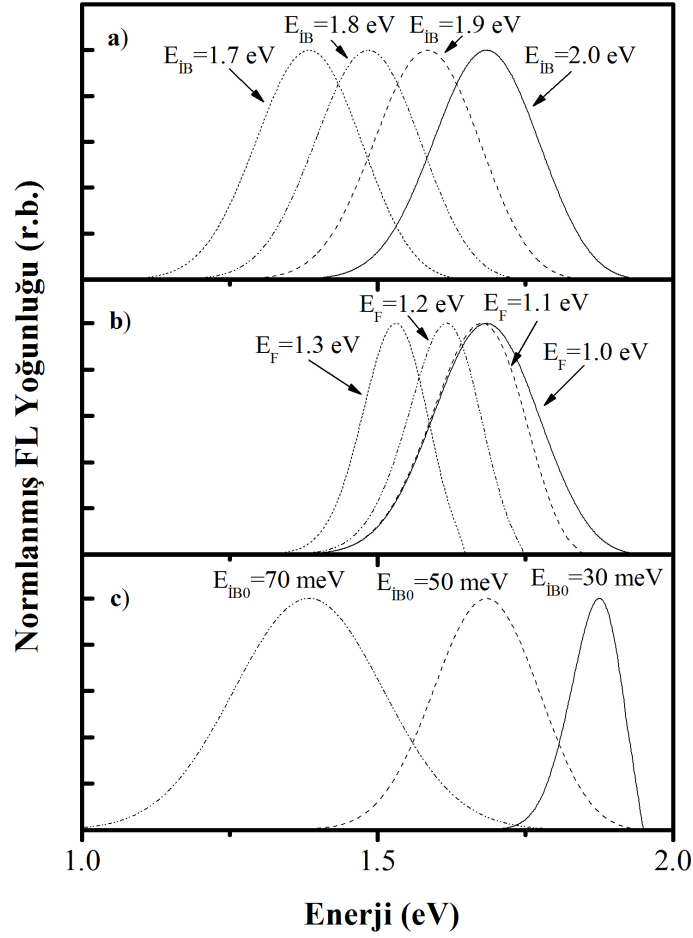
Oda sıcaklığı normlanmış fotoluminesans yoğunluğu  $I(\hbar\omega)$ , Bölüm 1.4.3'te verilen eşitlik 1.27'den hesaplanarak Şekil 4.21'de çizdirilmiştir. Bu hesaplamalarda, yasak enerji aralığı, iletim bant kenarı enerjisi ve değerlik bant kenarı enerjisinin farkı olarak alınmıştır ( $E_{Gap\ model}=E_{IB}-E_{DB}$ ). Düzensizlik parametreleri  $E_{IB0}$  ve  $E_{DB0}$ , değerlik ve iletim bant uzantı durumlarının arasındaki farkların göz önünde bulundurulması ve a-Si:H'un özelliklerine uygun olması amaçlanarak,  $E_{DB0} = 1.5E_{IB0}$  olarak alınmıştır (Street, 1991). Şekil 4.21a'da enerji bant aralığının artmasıyla fotoluminesans spektrumunun yüksek enerjilere doğru kaydığı görülmektedir. Fotoluminesans spektrumlarının maksimumlarının, enerji bant aralıklarından daha küçük olmaları, ışımali yeniden birleşmelerin bant uzantılarından termalizasyon sonrasında bant uzantı durumları arasındaki birleşmelerden kaynaklandığını göstermektedir. Şekil 4.21b'de Fermi enerjisinin yüksek enerjilere doğru kayması sonucunda fotoluminesans spektrumunun genişliğinin azaldığı ve maksimumunun ise



küçük enerjilere doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, ışımalı birleşmelerin değerlik ve iletim bant uzantılarının daha derin durumlarından oluşma olasılıklarının artması şeklinde açıklanabilir. Son olarak, Şekil 4.21c'de fotoluminesans yoğunluğu düzensizlik parametresinin fonksiyonu olarak çizdirilmiştir. Düzensizlik arttıkça fotoluminesans spektrumunun genişliğinin arttığı ve maksimumunun ise daha küçük enerjilere kaydığı görülmüştür.

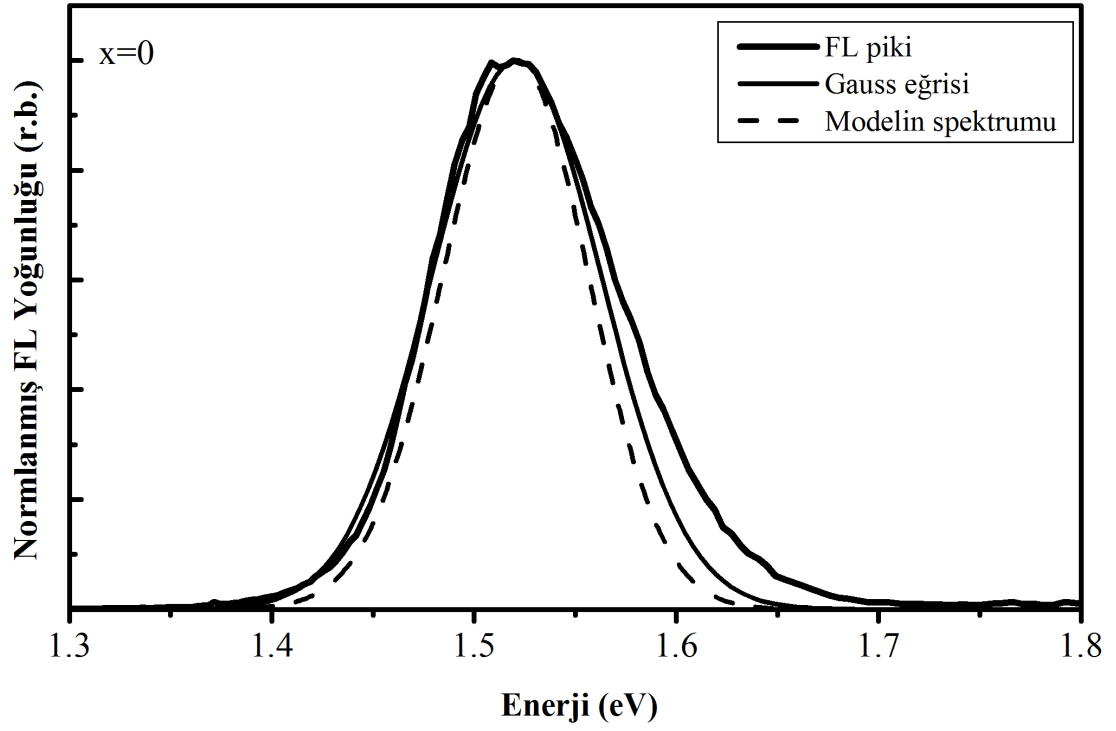


Şekil 4.20. a) Enerjinin fonksiyonu olarak, farklı bant kenarı durum yoğunlukları ( $N_0=N_{IB0}=N_{DB0}$ ) için değerlik (DB) ve iletim (İB) bantı uzantıları durum yoğunlukları dağılımı. Burada  $E_F=1$  eV,  $E_{Gap\ model}=2.0$  eV,  $E_{IB0}=50$  meV ve  $E_{DB0}=75$  meV alınmıştır. b) Enerjinin fonksiyonu olarak, farklı bant uzantıları düzensizlik parametreleri için ( $E_{DB0}$  ve  $E_{IB0}$ ) değerlik (DB) ve iletim (İB) bantı uzantıları durum yoğunlukları dağılımı. Burada,  $E_F=1$  eV,  $E_{Gap\ model}=2.0$  eV ve  $N_0=10^{22}$  cm<sup>-3</sup> eV<sup>-1</sup> olarak alınmıştır.

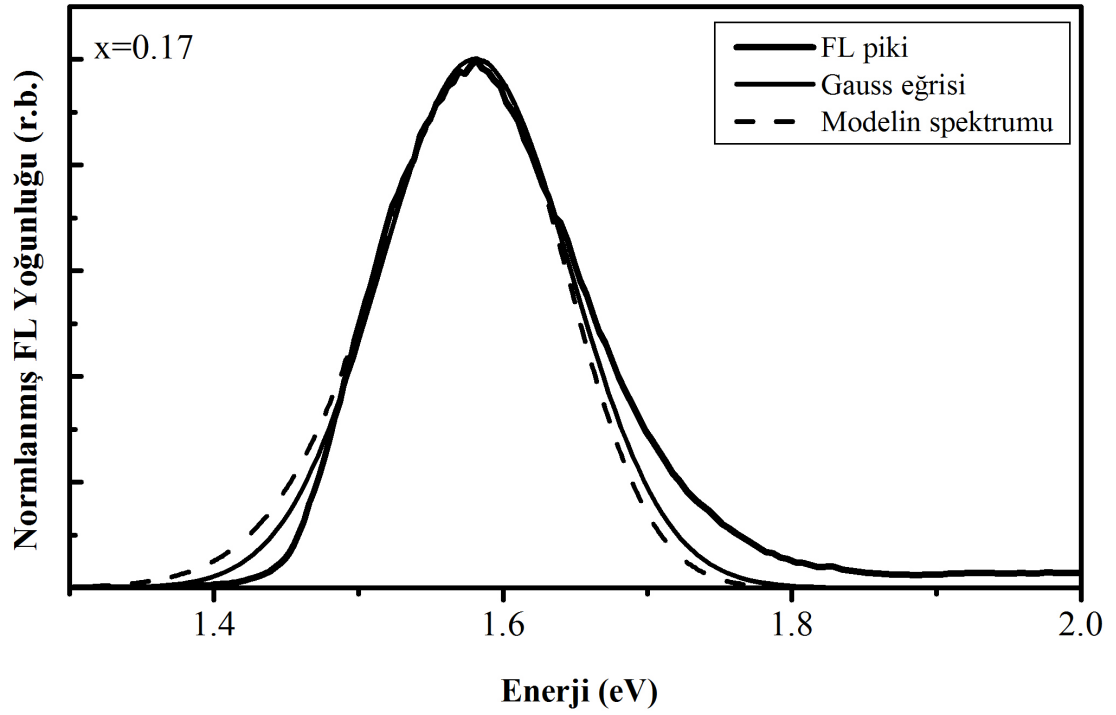


Şekil 4.21. Eşitlik 1.27'e göre hesaplanmış ve normlanmış, oda sıcaklığında fotoluminesans spektrumlarının farklı a) enerji bant aralıkları ( $E_{\text{Gap model}} = E_{\text{IB}} - E_{\text{DB}}$ ), b) Fermi enerjileri ve c) düzensizlik parametrelerinin fonksiyonu olarak grafiği. Burada;  $E_{\text{DB0}} = 1.5E_{\text{IB0}}$ ,  $N_0 = 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ ,  $E_{\text{Gap model}} = 2.0 \text{ eV}$ ,  $E_{\text{F}} = 1.0 \text{ eV}$ ,  $E_{\text{IB0}} = 50 \text{ meV}$  ve  $E_{\text{DB0}} = 75 \text{ meV}$  olarak alınmıştır.

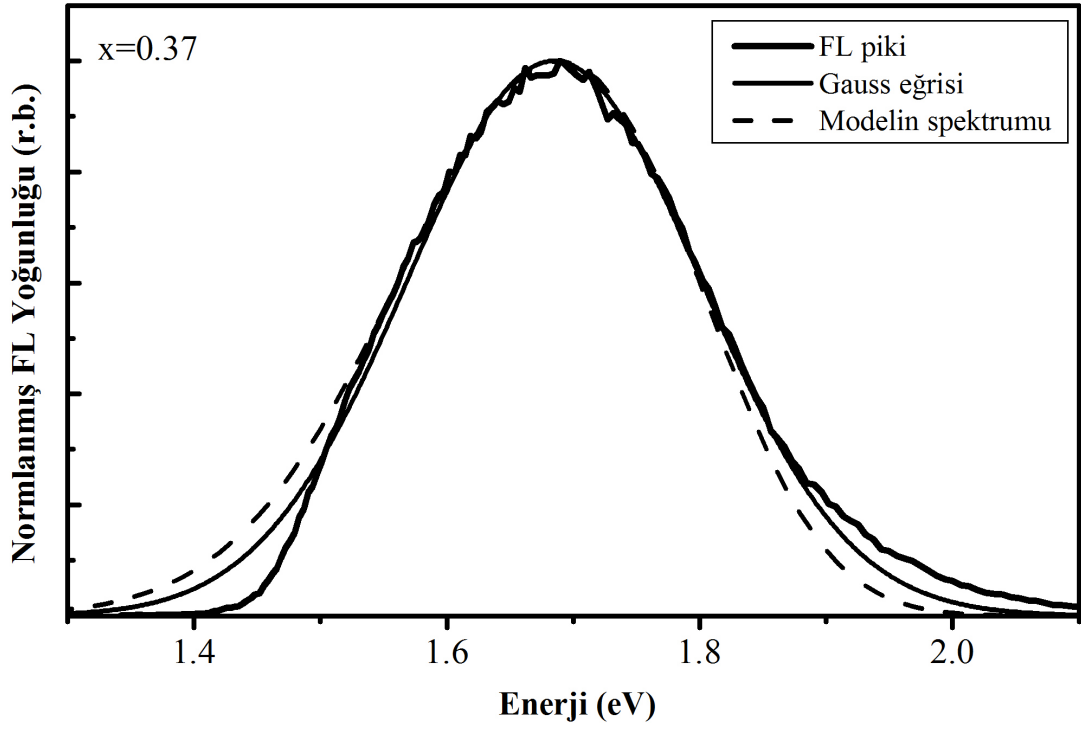
Bu model, a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin oda sıcaklığı fotoluminesans spektrumlarını analiz etmek için kullanılmıştır. Bu amaçla normlanmış ve Gauss eğrilerine uydurulmuş olan fotoluminesans spektrumları bu çalışma kapsamında yazılmış olan bilgisayar programı ile modelde önerilmiş olan  $I(\hbar\omega)$  eşitliğine  $E_{\text{F}}$ ,  $E_{\text{Gap model}}$ ,  $N_0$ ,  $E_{\text{IB0}}$  ve  $E_{\text{DB0}}$  değerleri belirlenerek uydurulmuştur. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin oda sıcaklığı fotoluminesans spektrumu ölçüm verileri ve model tarafından üretilen spektrum beraber olarak sunulmuştur. Ayrıca uydurulan model spektrumlarında  $N_{\text{IB0}} = N_{\text{DB0}} = 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$  ve  $E_{\text{DB0}} = 1.5E_{\text{IB0}}$  değerleri kullanılmıştır. Ölçülmüş fotoluminesans spektrumlarına uydurulmuş Gauss eğrileri ile modelin spektrumunun birbirleri ile uyduğu gözlemlenmiştir.



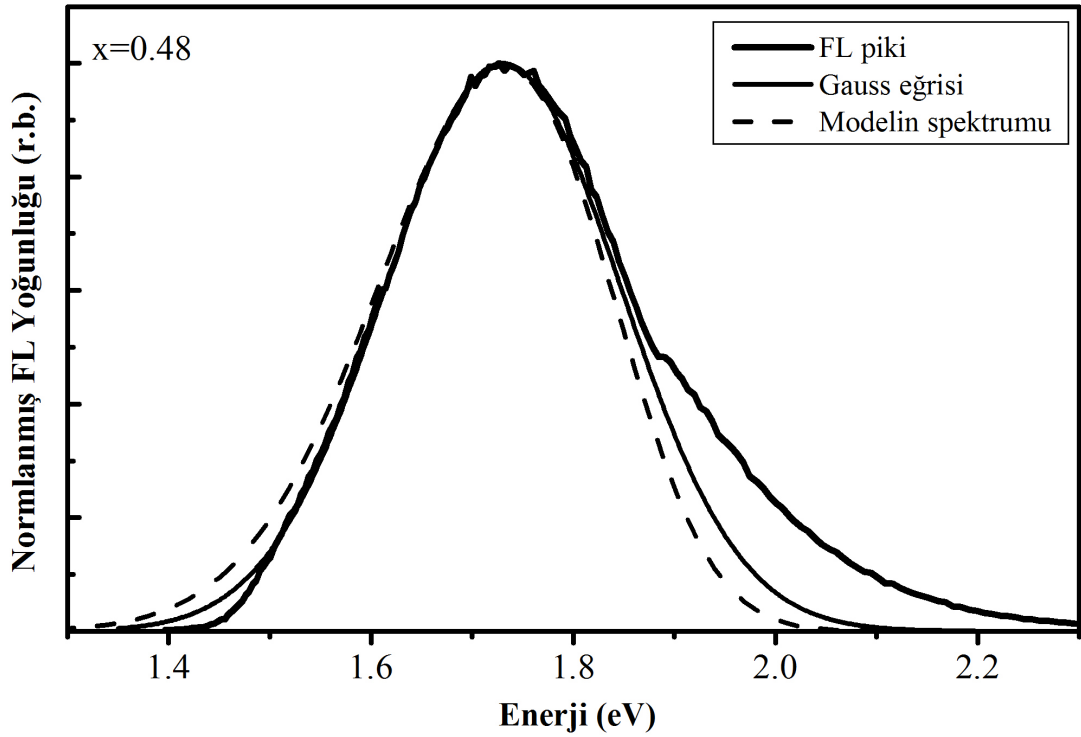
Şekil 4.22. DG, x=0 a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.



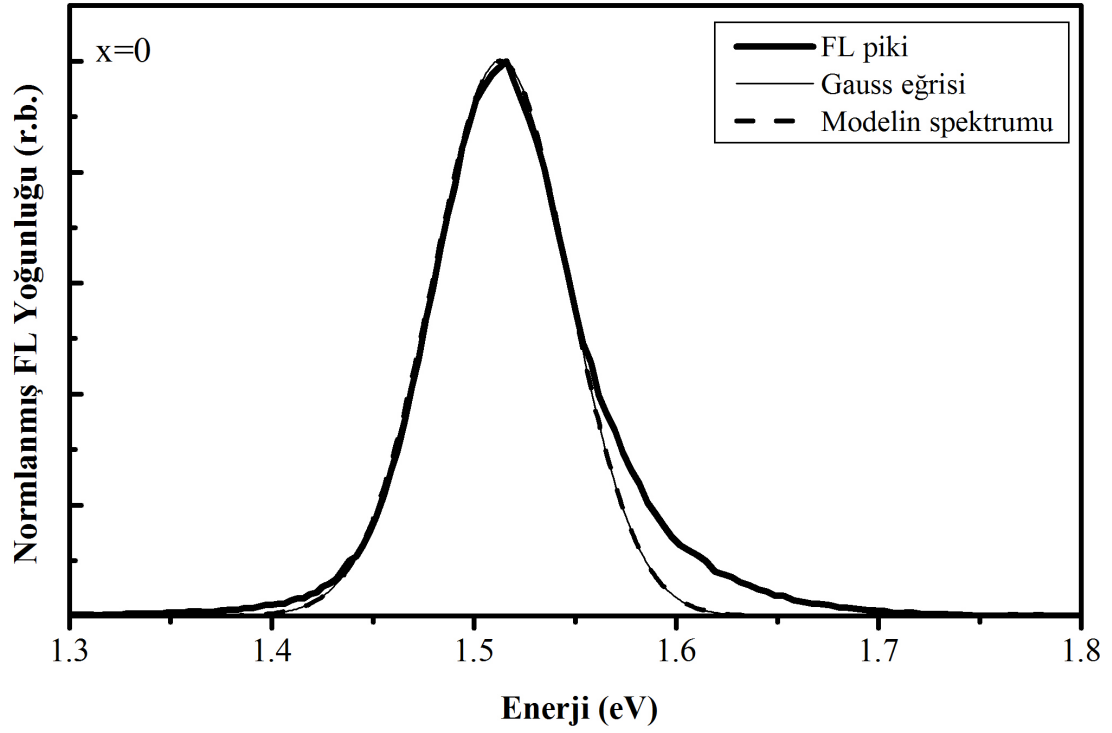
Şekil 4.23. DG, x=0.17 a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.



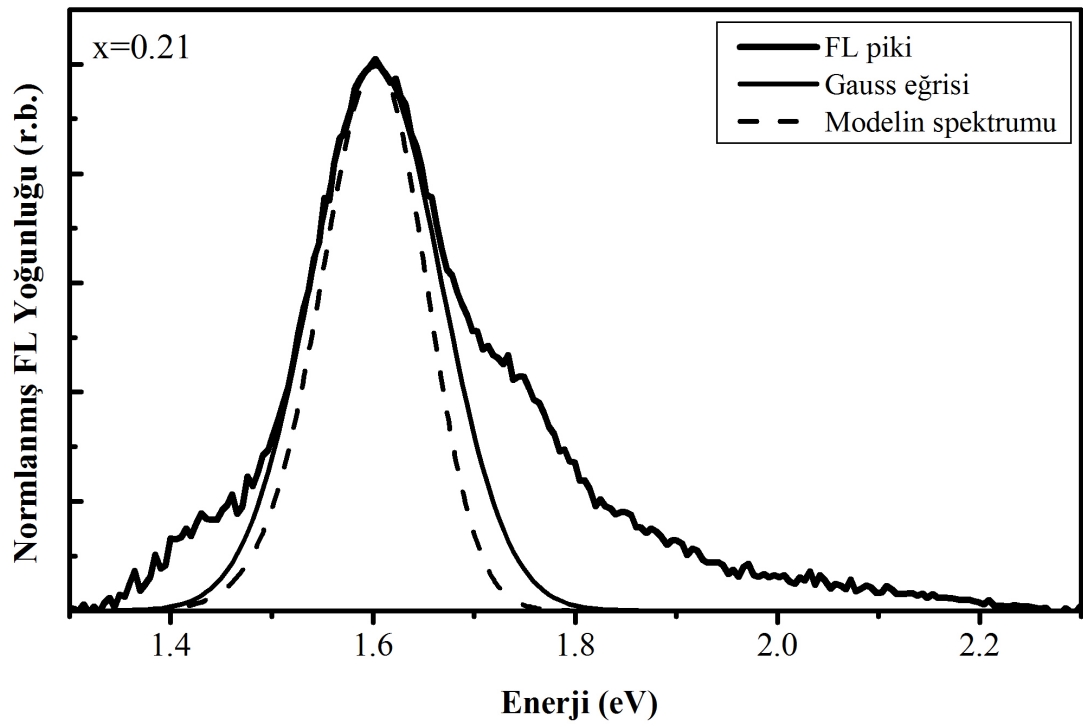
Şekil 4.24. DG,  $x=0.37$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.



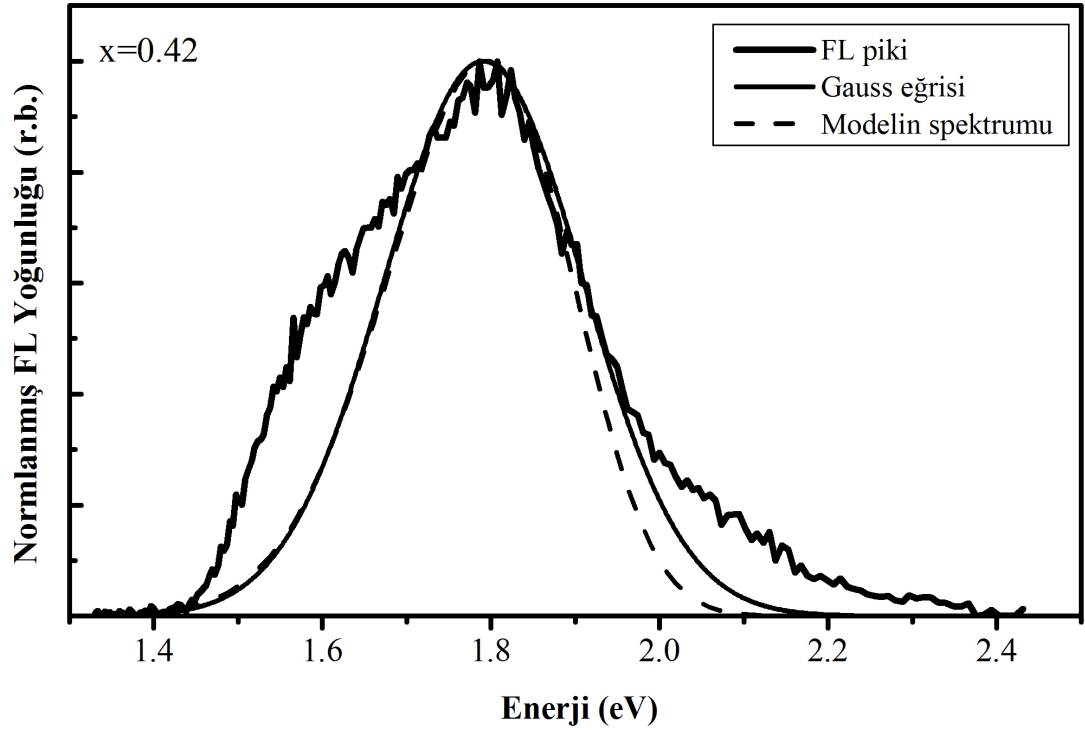
Şekil 4.25. DG,  $x=0.48$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.



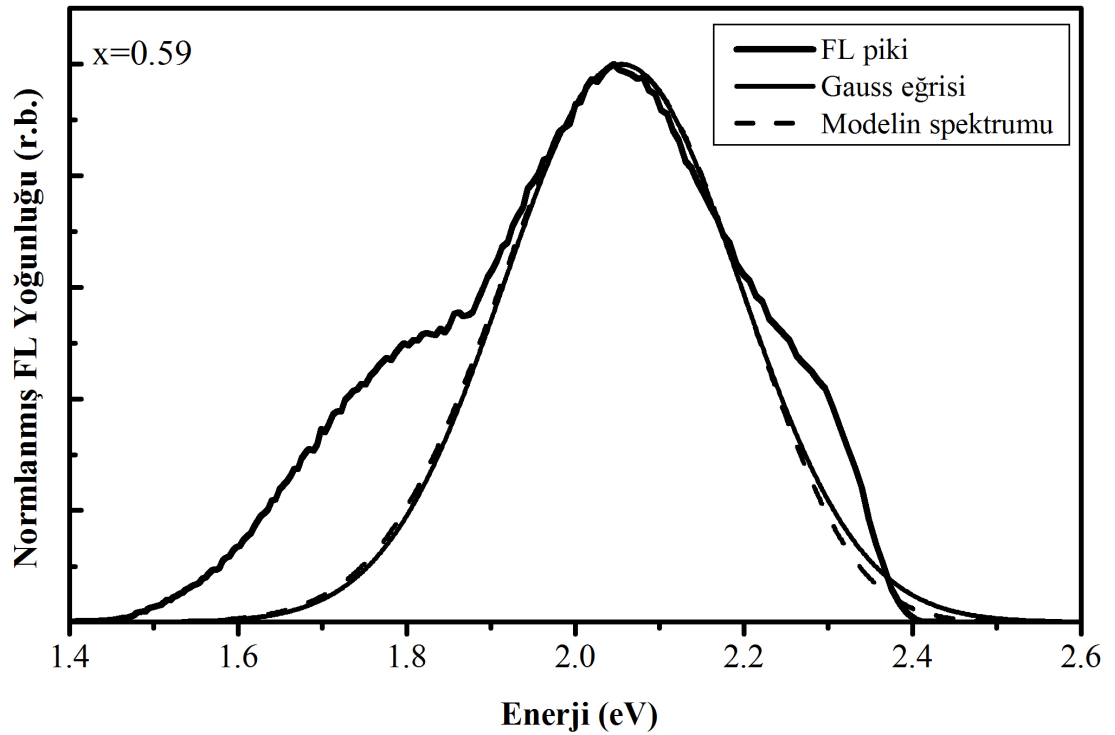
Şekil 4.26. YG,  $x=0$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.



Şekil 4.27. YG,  $x=0.21$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.

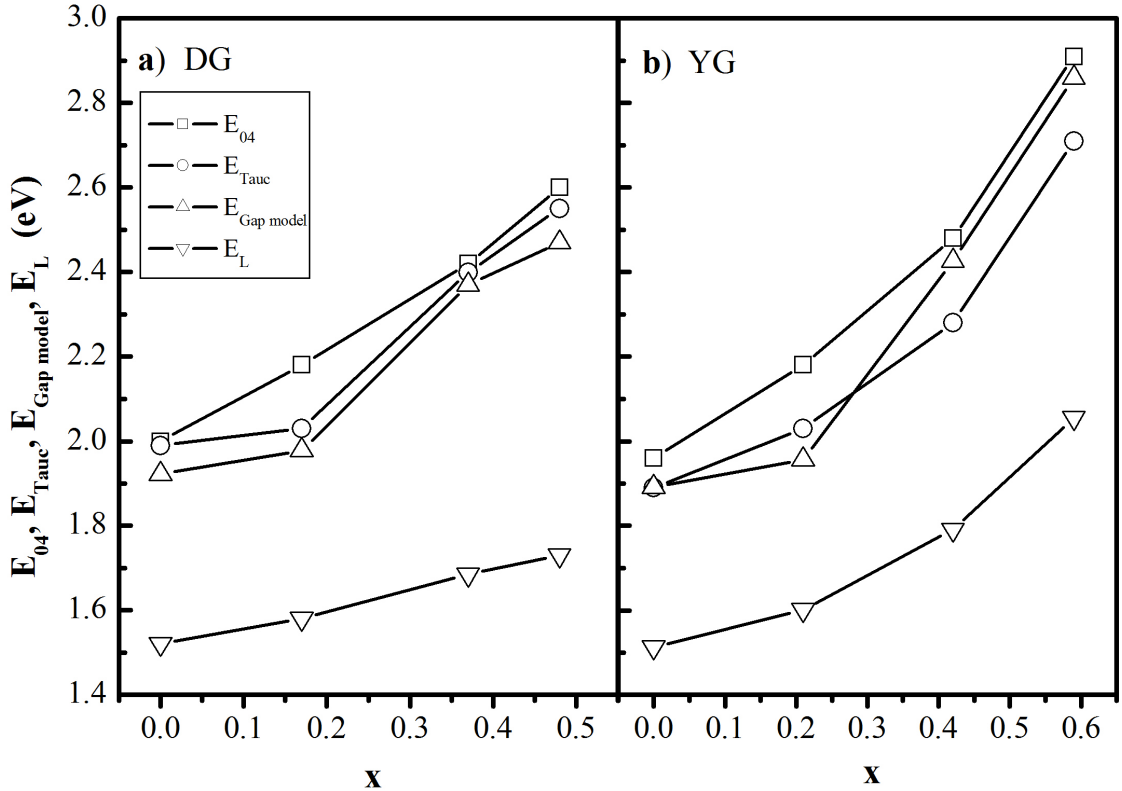


Şekil 4.28. YG,  $x=0.42$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.

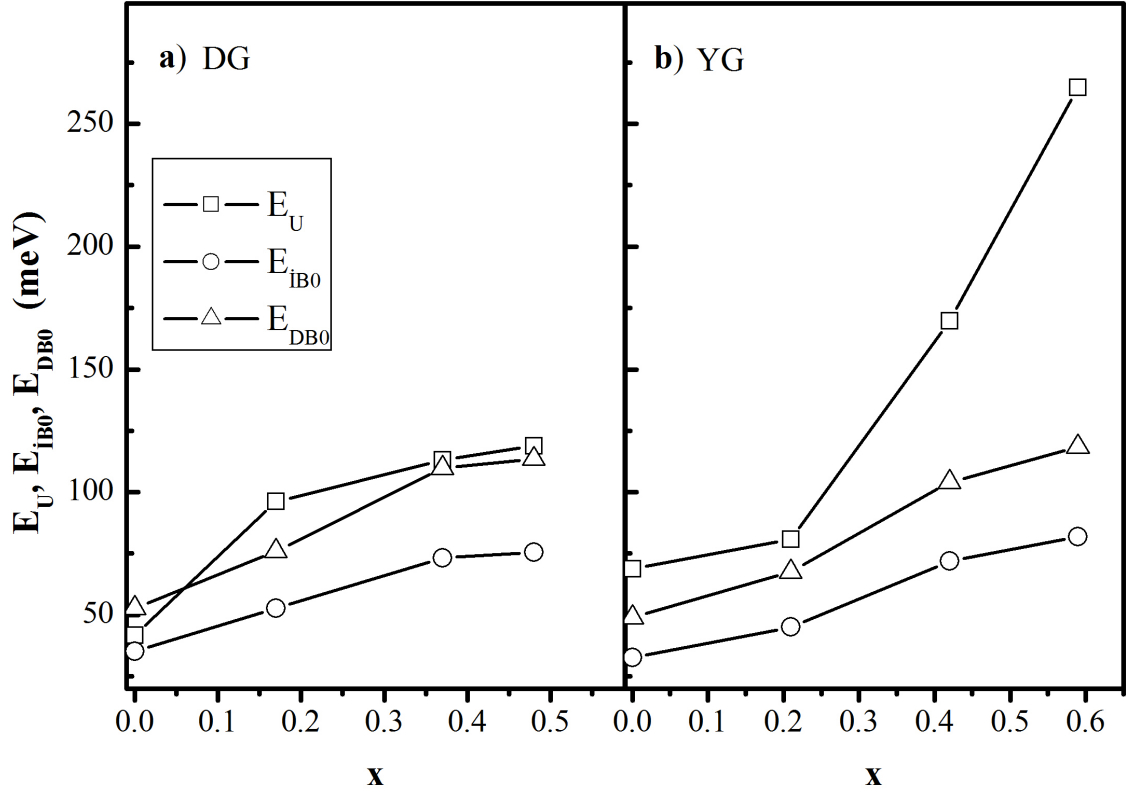


Şekil 4.29. YG,  $x=0.59$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu.

Önerilen model ışığında a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans spektrumları ile modelin spektrumlarının  $E_{\text{Gap model}}$ ,  $E_{\text{IB0}}$  ve  $E_{\text{DB0}}$  değerleri,  $E_{04}$ ,  $E_{\text{Tauc}}$ ,  $E_U$  ve  $E_L$  ile beraber  $x$ 'in fonksiyonu olarak Şekil 4.30 ve 4.31'de çizdirilmiştir. Bu parametrelerin hepsinin karbon içeriği ile yaklaşık olarak doğrusal arttığı gözlemlenmiştir. Modelin enerji bant aralığı değerleri ( $E_{\text{Gap model}}$ ),  $E_{04}$  ve  $E_{\text{Tauc}}$  ile beraber artmakla birlikte, genelde  $E_{04}$ 'ten küçüktür. Bu trend, ışımali yeniden birleşmelerin baskın olarak modelde varsayıldığı gibi iletim ve değerlik bant uzantı durumları arasındaki geçişlerden kaynaklandığını göstermektedir. Şekil 4.31a'da, DG a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerde  $E_{\text{DB0}}$  ile  $E_U$  değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir ( $E_{\text{DB0}}=1.5E_{\text{IB0}}$ ); diğer yandan, Şekil 4.31a'da YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerde karbon içeriğinin artmasıyla aralarındaki farkın arttığı gözlemlenmiştir. İletim ve değerlik bant uzantılarının bir bileşke temsili olarak Urbach enerjisinde, iletim bandına göre daha geniş olan değerlik bant uzantısının baskınlığının daha fazla olması elde edilen sonuçlardaki  $E_{\text{DB0}}$  ile  $E_U$  arasındaki ilişki ile uyumaktadır (Robertson, 1986; Street, 1991; Akaoglu ve ark., 2008).



Şekil 4.30. DG ve YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmler için  $E_{04}$ ,  $E_{\text{Tauc}}$ ,  $E_{\text{Gap model}}$  ve  $E_L$ 'nin  $x$ 'in fonksiyonu olarak grafiği.



Şekil 4.31. DG ve YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmler için  $E_U$ ,  $E_{IB0}$  ve  $E_{DB0}$ 'ın x'in fonksiyonu olarak grafiği.



## BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kristal ve amorf yarıiletkenlerin özellikleri özetlendi. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin yapısal ve elektronik özellikleri, a-Si:H ve a-C:H filmlerin özellikleri ışığında teorik olarak incelendi. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin yapısı, karbonun tetrahedral, grafitik ve olefinik yapıları oluşturabilmesi ve silisyumun tetrahedral yapıda olması sonucunda, karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak tetrahedral, grafitik ve olefinik gibi farklı yapıları içermektedir. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin ışımaya mekanizmaları Street'in önerdiği 'elektron-fonon çiftleşmesi modeli' ve Boulitrop ve Dunstan'ın önerdiği 'statik düzensizlik modeli' çerçevesinde teorik olarak incelendi. Bunlara ek olarak a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin, Gauss fonksiyonu cinsinden tanımlanan iletim ve değerlik bant uzantı durum yoğunluklarının birleşik durum yoğunluğu dağılımı ile oda sıcaklığında fotoluminesans ışımaya mekanizması modellendi.

Bu çalışmada, iki farklı RF güç yoğunluğunda ve dört farklı karbon içeriğinde plazma destekli kimyasal buhar biriktirme sistemi ile daha önceden büyütülmüş olan a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin karbon içerikleri, X-ışını foto-elektron spektroskopisi ölçümleri ile belirlendi. Karbon içeriğinin, DG filmlerde  $0 \leq x \leq 0.48$  aralığında, YG filmlerde  $0 \leq x \leq 0.59$  aralığında olduğu belirlendi.

Morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi analizleri ile a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin kalınlıkları ve optik enerjileri belirlendi. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin kalınlıklarının 226 nm ile 748 nm arasında olduğu, optik enerjilerinin DG filmler için 2.00 eV ile 2.60 eV; YG filmler için 1.89 eV ile 2.71 eV arasında olduğu belirlendi. x'in artması ile optik enerjilerin arttığı gözlemlendi.

Fotoluminesans spektroskopisi sisteminin kurulumu başarı ile gerçekleştirildi ve a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans spektrumları ölçüldü. Oda sıcaklığı fotoluminesans spektrumları Gauss fonksiyonuna uydurularak maksimumları ve tam genişlik yarı maksimumları hesaplandı. Fotoluminesans maksimumları, DG filmler için 1.52 eV ile 1.73 eV aralığında, YG filmler için 1.51 eV ile 2.06 eV aralığında bulundu. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin, x'in artması ile fotoluminesans maksimumlarının daha yüksek enerjilere doğru kaydığı ve tam genişlik yarı maksimumlarının arttığı gözlemlendi. x'e bağlı olarak fotoluminesans maksimumları ve tam genişlik yarı maksimumları, YG filmlerde DG filmlere kıyasla daha fazla arttı. DG ve YG filmler için E<sub>L</sub>, E<sub>Tauc</sub> ve E<sub>04</sub> enerjileri ile x arasındaki ilişki ve E<sub>U</sub> ve ΔE<sub>L</sub> ile x arasındaki ilişki incelendi ve aralarında yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlendi. Buna ek olarak, x'in artışı ile E<sub>L</sub> ve ΔE<sub>L</sub>'nin YG

filmlerde, DG filmlere oranla daha fazla arttığı gözlemlendi. Bu, güç yoğunluğunun artmasına bağlı olarak yapıya daha fazla karbonun dahil olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca,  $x$ 'e bağlı olarak  $E_U$  ve  $\Delta E_L$ 'deki artış, ışımali yeniden birleşmelerin yaygın bant durumlarından bant uzantılarına doğru termalizasyon sonucunda, iletim bant uzantı durumlarından değerlik bant uzantı durumlarına doğru gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Oda sıcaklığındaki ölçümlerin yanı sıra, DG,  $x=0.48$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi ve YG,  $x=0.42$  a-SiC<sub>x</sub>:H filmi için çeşitli sıcaklıklarda da ölçüm alınarak fotoluminesans spektrumları incelendi. Genel olarak azalan sıcaklıkla beraber fotoluminesans spektrumlarının şekillerinin değişmediği; diğer yandan fotoluminesans yoğunluğunun arttığı tespit edildi. Fotoluminesans spektrumlarının şeklinin oluşumunda; DG filmlerde elektron-fonon çitleşmesi modelinin, YG filmlerde ise statik düzensizlik modelinin baskın olduğu, bununla beraber her iki modelinde beraber olarak ışım mekanizmasında etkili olduğu gözlemlendi.

Bant uzantıları durum yoğunluklarının bileşke dağılımı ile ifade edilen oda sıcaklığı fotoluminesans modeli, a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin oda sıcaklığı fotoluminesans spektrumlarını analiz etmek için kullanıldı. Öncelikle modelde önerilmiş olan  $I(\hbar\omega)$  eşitliği ile ifade edilen fotoluminesans yoğunluğu; enerji bant aralığı ( $E_{\text{Gap model}}=E_{\text{IB}}-E_{\text{DB}}$ ), Fermi enerjisi ve düzensizlik parametrelerinin ( $E_{\text{IB0}}$  ve  $E_{\text{DB0}}$ ) her biri için ayrı ayrı nümerik olarak incelendi. Enerji bant aralığının artmasıyla, fotoluminesans spektrumunun yüksek enerjilere doğru kaydığı gözlemlendi. Fermi enerjisinin arttırılması sonucunda ise fotoluminesans spektrumunun genişliğinin azaldığı ve maksimumunun küçük enerjilere doğru kaydığı gözlemlendi. Düzensizlik parametresinin arttırılması sonucunda fotoluminesans spektrumunun genişliğinin arttığı ve maksimumunun ise daha küçük enerjilere kaydığı gözlemlendi. Sonrasında ise normlanmış ve Gauss eğrilerine uydurulmuş olan fotoluminesans spektrumları, bilgisayar programı ile modelde önerilmiş olan  $I(\hbar\omega)$  eşitliğine  $E_F$ ,  $E_{\text{Gap model}}$ ,  $N_0$ ,  $E_{\text{IB0}}$  ve  $E_{\text{DB0}}$  değerleri belirlenerek uyduruldu. a-SiC<sub>x</sub>:H filmlerin fotoluminesans spektrumları ile önerilen modelin spektrumlarının birbirleri ile uyduğu görüldü. Model spektrumlarının  $E_{\text{Gap model}}$ ,  $E_U$ ,  $E_{\text{IB0}}$  ve  $E_{\text{DB0}}$  değerleri ve UV-Visible ölçümlerinden hesaplanan  $E_{04}$ ,  $E_{\text{Tauc}}$  değerleri arasındaki ilişki  $x$ 'in fonksiyonu olarak incelendi ve  $x$ 'in artması ile bu değerlerin yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlendi.  $E_{\text{Gap model}}$  değerlerinin  $E_{04}$ 'ten küçük olması, ışımali yeniden birleşmelerin iletim ve değerlik bant uzantı durumları arasındaki birleşmelerden kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca DG filmlerde;  $E_{\text{DB0}}$  ile  $E_U$  değerlerinin birbirlerine daha yakın

olduğu görülür iken, YG filmlerde karbon içeriğinin artmasıyla birlikte aralarındaki farkın arttığı görüldü.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında karbon içeriğinin ve RF güç yoğunluğunun a-SiC<sub>x</sub>:H ince filmlerin fotoluminesans spektrumlarına etkileri belirlendi ve literatürdeki iki ışımaya modelinin yanı sıra önerilen ışımaya modeli ile analiz edildi. Bu analizlerin ışığında a-SiC<sub>x</sub>:H ince filmlerin ışık diyotlarda kullanılabileceği; ışımaya veriminin ve enerjisinin artırılmasında bant uzantı durum yoğunluklarının etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Ambrosone G., Ballarini V., Coscia U., Ferrero S., Giorgis F., Maddalena P., Patelli A., Rava P. ve Rigato V., 2003. Properties of a-SiC:H Films Deposited in Power Regime. *Thin Solid Films*, 427: 279-283.
- Akaoğlu B., 2004. Optical Properties of Silicon Based Amorphous Thin Films (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Akaoğlu B., Sel K., Atılgan İ ve Katırcıoğlu B., 2008. Carbon Content Influence on the Optical Constants of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbon Alloys. *Optical Materials*, 30: 1257-1267.
- Boulitrop F. ve Dunstan D.J., 1983. Phonon Interactions in the Tail States of a-Si:H. *Physical Review B*, 28 (10): 5923-5929.
- Briggs D, Seah M.P. (Eds.), 1990. *Practical Surface Analysis Vol. 1: Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy*, John Wiley and Sons Chichester, UK.
- Bullot J. ve Schmidt M.P., 1987. Physics of Amorphous Silicon-Carbon Alloys. *Physica Status Solidi B*, 143: 345-418.
- Demichelis F., Crovini G., Giorgis F., Piri C.F. ve Tresso E., 1995. Comparison Between Methane and Acetylene as Carbon Sources for C-Rich a-SiC:H Films. *Diamond and Related Materials*, 4: 473-477.
- Dunstan D.J. ve Boulitrop F., 1984. Photoluminescence in Hydrogenated Amorphous Silicon. *Physical Review B*, 30 (10): 5945-5957.
- ET Enterprises LTD, August 25, 2010. *29 mm Photomultiplier 9130/350B Series Data Sheet*. December 5, 2011, [http://my.et-enterprises.com/pdf/9130\\_350B.pdf](http://my.et-enterprises.com/pdf/9130_350B.pdf)
- ET Enterprises LTD, April 5, 2007. *Cooled Detector Sub-assembly Type CDM30*. December 5, 2011, <http://my.et-enterprises.com/pdf/CDM30.pdf>

- Fox M., 2001. *Optical Properties of Solids*. Oxford University Press, Oxford. 305 p.
- Giorgis F., Mandracci P., Negro L.D., Mazzoleni C. ve Pavesi L., 2000. Optical Absorption and Luminescence Properties of Wide-Band Gap Amorphous Silicon Based Alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 266-269: 588-592.
- Giorgis F., Ambrosone G., Coscia U., Ferrero S., Mandracci P., Mandracci P. ve Pirri C.F., 2001. Structural and Optical Properties of a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H Grown by Plasma Enhanced CVD. *Applied Surface Science*, 184: 204-208.
- Hamakawa Y., Kruangam D., Toyama T., Yoshimi M., Paasche S. ve Okamoto H., 1989. *Optoelectronic-Devices Technology*, 4: 281.
- John P. ve Steve M., 2003. *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*, Butterworth-Heinemann, Australia.
- Kanicki J., 1991. *Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices: Optoelectronic Devices*. Artech House, London.
- Kumbhar A., Patil S.B., Kumar S., Lal R. ve Dusane R.O., 2001. Photoluminescent, Wide-Bandgap a-SiC:H Alloy Films Deposited by Cat-CVD Using Acetylene. *Thin Solid Films*, 395: 244-248.
- Liu S., Gangopadhyay S., Sreenivas G., Ang S.S. ve Naseem H.A., 1997. Photoluminescence Studies of Hydrogenated Amorphous Carbon and Its Alloys. *Journal of Applied Physics*, 82 (9): 4508-4514.
- Ma T., Xu J., Du J., Li W., Huang X. ve Chen K., 2000. Full Color Light Emission from Amorphous SiC<sub>x</sub>:H with Organic-Inorganic Structures. *Journal of Applied Physics*, 88 (11): 6408-6412.

- Magalhaes C.S., Bittencourt C., Tessler L.R. ve Alvarez F., 1993. Photoluminescence Studies on Silicon Carbon Alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 164-166: 1027-1030.
- Manifacier J.C., Gasiot J. ve Fillard J.P., 1976. A Simple Method for the Determination of the Optical Constants  $n$ ,  $k$  and Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9: 1002-1004.
- Moulder J.F, Stickle W.F, Sobol P.E., Bomben K.D., in: J. Chastain, P.E. Corporation, E. Prairie (Eds.), 1992. *Handbook of X-ray Photoelectrons Spectroscopy*, MN.
- National Instruments, 2003. *Labview User Manuals*. April, 2003 Edition, Part Number 320999E-01: I-32 p.
- Newport, 2006/07. *The Newport Resource*. 1456 p.
- Orapunt F. ve O'Leary S.K., 2008. Optical Transitions and the Mobility Edge in Amorphous Semiconductors: A Joint Density of States Analysis. *Journal of Applied Physics*, 104: 073513-1-14.
- Palsule C., Gangopadhyay S., Cronauer D. ve Schröder B., 1993. Photoluminescence Characterization of a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H Alloys Prepared by Cosputtering. *Physical Review B*, 48 (15): 10804-10814.
- Robertson J., 1986. Amorphous Carbon. *Advances in Physics*, 35 (4): 317-374.
- Robertson J. ve O'Reilly E.P., 1987. Electronic and Atomic Structure of Amorphous Carbon. *Physical Review B*, 35 (6): 2946-2957.
- Robertson J., 1991. Preparation and Properties of Amorphous Carbon. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 137-138: 825-830.
- Robertson J., 1992 (a). The Electronic and Atomic Structure of Hydrogenated Amorphous Si-C Alloys. *Philosophical Magazine B*, 66 (5): 615-638.

- Robertson J., 1992 (b). Properties of Diamond-Like Carbon. *Surface and Coatings Technology*, 50 (3): 185-203.
- Searle T.M. ve Jackson W.A., 1989. Static Versus Electron-Phonon Disorder in Amorphous Si:H and Its Alloys. *Philosophical Magazine B*, 60 (2): 237-255.
- Sel K., 2007. The Effects of Carbon Content on the Properties of Plasma Deposited Amorphous Silicon Carbide Thin Films (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Stanford Research Systems, Revision 2.6 June, 2009. *Model SR540 Optical Chopper*. 20 p.
- Stanford Research Systems, Revision 2.5 October, 2011. *Model SR830 Digital Signal Processor (DSP) Lock-in Amplifier*. 7-34 p.
- Street R.A., 1976. Luminescence in Amorphous Semiconductors. *Advances in Physics*, 24 (4): 397-454.
- Street R.A., 1981. Luminescence and Recombination in Hydrogenated Amorphous Silicon. *Advances in Physics*, 30 (5): 593-676.
- Street R.A., 1991. *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge University Press, Cambridge. 417 p.
- Sussmann R.S. ve Ogden R., 1981. Photoluminescence and Optical Properties of Plasma-Deposited Amorphous  $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$  Alloys. *Philosophical Magazine B*, 44 (1): 137-158.
- Swanepoel R., 1983. Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16: 1214-1220.
- Swanepoel R., 1984. Determination of Surface Roughness and Optical Constants of Inhomogeneous Amorphous Silicon Films. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 17: 896-903.

- Tessler L.R. ve Solomon I., 1995. Photoluminescence of Tetrahedrally Coordinated a-Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>:H. *Physical Review B*, 52 (15): 10962-10971.
- Thomas D.G., Hopfield J.J. ve Augustyniak W.M., 1965. Kinetics of Radiative Recombination at Randomly Distributed Donors and Acceptors. *Physical Review*, 140 (1A): A202-A220.
- Tikhonravov A.V. ve Trubetskov M.K., 2002. *Optichar Software*. <http://www.optilayer.com>, Version 4.13.
- Tsang C. ve Street R.A., 1979. Recombination in Plasma-Deposited Amorphous Si:H, Luminescence Decay. *Physical Review B*, 19 (6): 3027-3040.
- Wang L., Xu J., Ma T., Li W., Huang X. ve Chen K., 1999. The Influence of the Growth Conditions on the Structural and Optical Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, 290: 273-278.
- Wang Y.H., Lin J. ve Huan C.H.A., 2002. Multiphase Structure of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films. *Materials Science and Engineering B*, 95: 43-50.
- Xu J., Yang L., Rui Y., Mei J., Zhang X., Li W., Ma Z., Xu L., Huang X. ve Chen K., 2005. Photoluminescence Characteristics from Amorphous SiC Thin Films with Various Structures Deposited at Low Temperature. *Solid State Communications*, 133: 565-568.
- Yu Y. ve Cardona M., 2001. *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (3rd ed.). Springer, Berlin. 345-349.



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa No
3.1.	Ion-laser Technology 5500 A model lazerin ışımaya dalgaboyları ve güçleri .....	34
4.1.	a-SiC <sub>x</sub> :H filmlerin XPS ve UV-Visible spektroskopisi analizleri ile belirlenen karbon içeriği (x), film kalınlıkları, E <sub>04</sub> , E <sub>Tauc</sub> ve E <sub>U</sub> değerleri (Akaoglu, 2004; Sel, 2007; Akaoglu ve ark., 2008) .....	44

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa No
1.1.	a) Kristal ve b) amorf yapıların ve bu yapılardaki temel kusurların şematik gösterimi .....	4
1.2.	Tetrahedral yapı .....	5
1.3.	$sp^2$ türü hibritleşmiş karbon atomlarının yapısı (Grafitik yapı) ....	5
1.4.	$sp^1$ türü hibritleşmiş karbon atomlarının yapısı (Olefinik yapı).....	6
1.5.	a-SiC <sub>x</sub> :H'de bant uzantılarının değişimi ve kusur seviyeleri (Robertson, 1992 a) .....	7
1.6.	Amorf silisyumda elektron-deşik çiftinin termalize olması ve yeniden birleşme mekanizmalarının şeması .....	8
1.7.	Elektron-deşik çiftinin tamamen yada kısmen örtüşen dalga fonksiyonlarının yeniden birleşme ile ilişkisinin gösterimi (Street, 1991) .....	9
1.8.	Güçlü fonon çiftleşmesi ile bir malzemede soğurma ve yeniden birleşmeyi temsil eden yapılandırma koordinatı-enerjiyi ifade eden diyagram (Street, 1991) .....	11
1.9.	Uyarılma ile oluşan güçlü elektron-fonon çiftlenimi sonucunda soğurma ve yayma (lüminesans) spektrumları arasında meydana gelen enerji kayması (Stokes kayması) (Street, 1991) .....	13
3.1.	PDKBB sistemi .....	27
3.2.	XPS'de foto-emisyon işlemi .....	29
3.3.	Morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi sistemi .....	30
3.4.	Fotoluminesans spektroskopisi sistemi .....	31
3.5.	İyon lazerinin şeması: a) çoklu dalgaboylu, b) tek dalgaboylu .....	33
3.6.	Temel modu TEM <sub>00</sub> olan enine (transverse) elektromanyetik modlu (TEM) lazer ışınının çeşitli modlarının gösterimi .....	33
3.7.	Argon iyon lazerinin 488 nm'ye ayarlandığında ışınma spektrumu .....	34

<b>Şekil No</b>		<b>Sayfa No</b>
3.8.	Darbeleyici tekerlerinin şematik gösterimi .....	35
3.9.	Soğutucunun örnek haznesi bölümünün şeması .....	36
3.10.	a) Oriol MS257 model spektroskopik monokromatörde yandan ve eksen boyunca ilerleyen ışığın yolu b) çoklu kırınım ağı taret .....	37
3.11.	Foto-çoklayıcı detektör modülü .....	39
3.12.	Tipik spektral tepki eğrileri .....	39
4.1.	a-SiC <sub>x</sub> :H filmlerin Si 2p ve C 1s enerji seviyelerindeki XPS spektrumu (Sel, 2007) .....	43
4.2.	a-SiC <sub>x</sub> :H filmlerin UV-Visible spektrumu (Akaoglu, 2004; Sel, 2007; Akaoglu ve ark., 2008) .....	44
4.3.	Fotoluminesans spektroskopi sisteminin optik bileşenlerinin konum ve açılarının farklı ayarlarında ölçülmüş kristal GaAsP örneğin fotoluminesans spektrumu .....	46
4.4.	Filtre tekerinde kullanılan 2 adet filtrenin (Filtre-I ve Filtre-II) geçirgenlik spektrumu .....	46
4.5.	Çentik filtrenin UV-Visible spektrumu .....	47
4.6.	488 nm lazer ışınının çentik filtre ve çentik filtresiz ölçülmüş spektrumu .....	47
4.7.	Kristal GaAsP'ın fotoluminesans maksimumu olan 722 nm'ye ayarlı monokromatör ile kilitlemeli yükseltecin ölçtüğü ışık yoğunluğunun, 50 Hz ve 100 Hz'lik filtreler devre dışı ve aktif durumda iken optik darbeleyicinin frekansına bağımlılığı .....	48
4.8.	DG, x=0 a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	49
4.9.	DG, x=0.17 a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	49
4.10.	DG, x=0.37 a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	50

<b>Şekil No</b>		<b>Sayfa No</b>
4.11.	DG, $x=0.48$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmin çeşitli sıcaklıklarda ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumları ve oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	50
4.12.	YG, $x=0$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	51
4.13.	YG, $x=0.21$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	51
4.14.	YG, $x=0.42$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmin çeşitli sıcaklıklarda ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumları ve oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	52
4.15.	YG, $x=0.59$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmin oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu ve uydurulan Gauss eğrisi .....	52
4.16.	DG ve YG a-SiC <sub>x</sub> :H filmler için $E_{04}$ , $E_{Tauc}$ ve $E_L$ 'nin $x$ 'in fonksiyonu olarak grafiği .....	54
4.17.	DG ve YG a-SiC <sub>x</sub> :H filmler için $E_U$ ve $\Delta E_L$ 'nin $x$ 'in fonksiyonu olarak grafiği .....	54
4.18.	DG ve YG a-SiC <sub>x</sub> :H filmler için $(\Delta E_L)^2$ 'nin $E_{04}-E_L$ 'nin fonksiyonu olarak grafiği .....	55
4.19.	DG ve YG a-SiC <sub>x</sub> :H filmler için $\Delta E_L$ 'nin $E_U$ 'nun fonksiyonu olarak grafiği .....	56
4.20.	a) Enerjinin fonksiyonu olarak, farklı bant kenarı durum yoğunlukları ( $N_0=N_{IB0}=N_{DB0}$ ) için değerlik (DB) ve iletim (İB) bandı uzantıları durum yoğunlukları dağılımı. Burada $E_F=1$ eV, $E_{Gap\ model}=2.0$ eV, $E_{IB0}=50$ meV ve $E_{DB0}=75$ meV alınmıştır. b) Enerjinin fonksiyonu olarak, farklı bant uzantıları düzensizlik parametreleri için ( $E_{DB0}$ ve $E_{IB0}$ ) değerlik (DB) ve iletim (İB) bandı uzantıları durum yoğunlukları dağılımı. Burada, $E_F=1$ eV, $E_{Gap\ model}=2.0$ eV ve $N_0=10^{22}$ cm <sup>-3</sup> eV <sup>-1</sup> olarak alınmıştır .....	57

4.21.	Eşitlik 1.27'e göre hesaplanmış ve normlanmış, oda sıcaklığında fotoluminesans spektrumlarının farklı a) enerji bant aralıkları ( $E_{\text{Gap model}}=E_{\text{IB}}-E_{\text{DB}}$ ), b) Fermi enerjileri ve c) düzensizlik parametrelerinin fonksiyonu olarak grafiği. Burada; $E_{\text{DB0}}=1.5E_{\text{IB0}}$ , $N_0=10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ , $E_{\text{Gap model}}= 2.0 \text{ eV}$ , $E_{\text{F}}=1.0 \text{ eV}$ , $E_{\text{IB0}}=50 \text{ meV}$ ve $E_{\text{DB0}}=75 \text{ meV}$ olarak alınmıştır .....	58
4.22.	DG, $x=0$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	59
4.23.	DG, $x=0.17$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	59
4.24.	DG, $x=0.37$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	60
4.25.	DG, $x=0.48$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	60
4.26.	YG, $x=0$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	61
4.27.	YG, $x=0.21$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	61
4.28.	YG, $x=0.42$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	62
4.29.	YG, $x=0.59$ a-SiC <sub>x</sub> :H filmi için oda sıcaklığında ölçülen normlanmış fotoluminesans spektrumu, uydurulan Gauss eğrisi ve modelin spektrumu .....	62
4.30.	DG ve YG a-SiC <sub>x</sub> :H filmler için $E_{04}$ , $E_{\text{Tauc}}$ , $E_{\text{Gap model}}$ ve $E_{\text{L}}$ 'nin $x$ 'in fonksiyonu olarak grafiği .....	63

**Şekil No****Sayfa No**

4.31. DG ve YG a-SiC<sub>x</sub>:H filmler için E<sub>U</sub>, E<sub>IB0</sub> ve E<sub>DB0</sub>'ın x'in fonksiyonu olarak grafiği .....

64

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: İbrahim GÜNEŞ

Doğum Yeri: MERKEZ / KARABÜK

Doğum Tarihi: 02/01/1988

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü.

Yüksek Lisans Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce.

### BİLİMSEL FAALİYETLERİ

#### *Bildiriler -Uluslararası –Ulusal*

1. İbrahim Güneş, Kıvanç Sel, Barış Akaoğlu, *Effects Of Plasma Power Density On The Photoluminescence Characteristics Of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films*, Türk Fizik Derneği 28. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum-Türkiye, 2011 (Sözlü Sunum).
2. İbrahim Güneş, Kıvanç Sel, Barış Akaoğlu, *Photoluminescence Characteristics Of a-SiC<sub>x</sub>:H Films Deposited By Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*, 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference, İstanbul, 2011 (Poster Sunumu).

### İLETİŞİM

E-posta Adresi: ibrahimgunes14@hotmail.com