ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) YARIİLETKENLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bekir Asilcan ÜNLÜ

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Bekir Asilcan ÜNLÜ tarafından hazırlanan **'$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) Yarıiletkenlerinin Doğrusal Olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi'** adlı tez çalışması 05/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ayhan ELMALI
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Aytunç ATEŞ
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ayhan ELMALI
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

05/09/2019



Bekir Asilcan ÜNLÜ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) YARIİLETKENLERİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bekir Asilcan ÜNLÜ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Ayhan ELMALI

Tez çalışmasında, $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken kristallerinden üretilen ince filmlerin doğrusal olmayan optik soğurma özellikleri deneysel ve teorik model ile araştırılmıştır. İnce filmler ısısal buharlaştırma sistemi ile vakum ortamında üretilmiştir. İnce filmler aynı kalınlıkta üretilmiş, film kalınlıkları spektroskopik elipsometre ile ölçülmüş ve 70 nm olarak bulunmuştur. İnce filmlerin yapısını belirlemek için X-ışını kırınımmetresi (XRD) kullanılmıştır. XRD sonuçlarına göre büyütülen filmlerin amorf yapıda olduğu bulunmuştur. İnce filmlerin doğrusal soğurma deneyleri yapılarak enerji band değerleri $TlInS_2$, $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$, $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ ve $TlGaS_2$ için sırasıyla 1.54, 1.58, 1.64 ve 1.76 eV olarak bulunmuştur. Değişen Ga/In oranına bağlı olarak kusur seviyelerinin değişimi hakkında bilgi edinmek adına Urbach enerjileri yapılan hesaplamalar sonucunda 0.63-0.80 eV aralığında elde edilmiş ve artan Ga oranı ile Urbach enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. İnce filmlerin Z-tarama deneyleri ns atmalı lazer ile yapılarak doğrusal olmayan soğurma ve doyum soğurmaları hem deneysel hem de teorik olarak araştırılmıştır. Isıl işlem görmemiş (tavlanmamış) örneklerin farklı şiddetlerde yapılan Z-tarama deneylerinden, 2.2 MW/cm^2 şiddeti için enerji band değerlerinin ve kusur seviylerinin değişimine bağlı olarak doğrusal olmayan soğurma katsayıları 3.46×10^3 - 8.31×10^3 cm/MW aralığında, eşik soğurma değerleri ise 5.01×10^3- 5.63×10^3 MW/cm^2 aralığında bulunmuştur. Tavlamanın filmlerin yapısı ve doğrusal olmayan optik özellikler üzerine etkisini araştırmak için fimler 200 °C de tavlanmıştır. Tavlananan $TlGaS_2$ örneği için ise kusur seviyelerindeki azalmaya bağlı olarak doğrusal olmayan soğurma katsayısının 3.46×10^3 cm/MW' dan 2.97×10^3 cm/MW'a, eşik soğurma değerinin 5.01×10^3 $MW/cm^{2'}$ den 4.87×10^3 $MW/cm^{2'}$ye düştüğü gözlemlenmiştir.

Eylül 2019, 38 Sayfa
Anahtar Kelimeler : Doğrusal olmayan soğurma, Yarıiletken, İnce film, Z-tarama

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) SEMICONDUCTORS

Bekir Asilcan ÜNLÜ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Engineering Physics

Supervisor : Prof.Dr.Ayhan ELMALI

In this study, nonlinear optical absorption properties of thin films of samples produced from $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) semiconductor crystals were investigated with experimental and theoretical model. Thin films were produced by vacuum evaporation system. Film thicknesses were measured as 70 nm by spectroscopic ellipsometer. X-ray diffraction (XRD) was used to determine the structures of the produced thin films. According to XRD results, the films were found to be amorphous. By using linear absorption experiments of thin films, energy band values were found as 1.54, 1.58, 1.64 and 1.76 eV for $TlInS_2$, $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$, $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ and $TlGaS_2$, respectively. Urbach energies were obtained in the range of 0.63-0.80 eV in order to obtain information about the change of defect levels due to the varying Ga / In ratio, and it was observed that Urbach energy decreased with increasing Ga ratio. Z-scan experiments of thin films were performed with nanosecond pulsed laser and nonlinear absorption and saturation absorption were investigated both experimentally and theoretically. From Z-scan experiments of non-annealed samples at different intensities, for 2.2 MW/cm^2 intensity experiement nonlinear absorption coefficients were found to be between 3.46×10^3 - 8.31×10^3 cm/MW and saturation intensity thresholds were found to be between 5.01×10^3- 5.63×10^3 MW/cm^2 due to the change of energy band gap values and defect levels. The films were annealed at 200 °C to investigate the effect of annealing on the structure and nonlinear optical properties of the films. For the annealed $TlGaS_2$ sample, the non-linear absorption coefficient decreased from 3.46×10^3 cm/MW to 2.97×10^3 cm/MW and saturation intensity threshold decreased from 5.01×10^3 $MW/cm^{2'}$ to 4.87×10^3 MW/cm^2 due to the decrease in defect levels.

September 2019, 38 page

Key Words : Nonlinear absorption, Semiconductor, Thin film, Z-scan

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince engin deneyimi ve bilgi birikimini benimle paylaşan, fikirleri ve yol göstericiliği ile çalışmalarımın ilerlemesine, gelişmesine imkan sağlayan değerli danışman hocam Prof.Dr.Ayhan Elmalı'ya

Tez çalışmalarımla ilgilenen, yorum, öneri ve geri bildirimleri ile tezime katkı sağlayan Doç.Dr.Mustafa Yüksek'e

Laboratuvar deneyimlerini, bilgilerini esirgemeden benimle paylaşan, hep destek olan Araş.Gör.Dr.Ahmet Karatay, Araş.Gör.Yasemin Pepe ve Öğr.Gör.Dr.Elif Akhüseyin'e,

Optik malzemeler araştırma laboratuvarı bünyesinde çalışan grup arkadaşlarım Ziya Tabak, Metin Arslan, Jale Yalçın ve Tuğçe Bozdağ'a

teşekkürlerimi sunarım.

Bekir Asilcan ÜNLÜ
Ankara, Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK ..... **i**

ÖZET ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

TEŞEKKÜR ..... **iv**

SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KURAMSAL TEMELLER **3**

2.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Soğurma **3**

2.1.1 Doğrusal soğurma **3**

2.1.2 Doğrusal olmayan soğurma **4**

2.1.2.1 İki foton soğurması **5**

2.1.2.2 Uyarılmış durum (doyurulabilir ve tersine doyurulabilir) soğurması **5**

2.1.2.3 Serbest taşıyıcı soğurması **7**

2.2 Amorf Yarıiletkenlerin Doğrusal Olmayan Optik Özellikleri **7**

3. MATERYAL ve YÖNTEM **10**

3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma **10**

3.1.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ yarıiletkenlerin ince filmlerinin üretilmesi **11**

3.2 Spektroskobik Elipsometre **12**

3.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ Yarıiletken İnce Filmlerinin Doğrusal Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji Bant Aralıklarının Belirlenmesi **14**

3.4 Urbach Enerji Değerlerinin Belirlenmesi **15**

3.5 Açık yarık Z-tarama deneyi **16**

3.6 Yarıiletken İnce Filmlere Isıl İşlem Uygulanması **19**

4. ARAŞTIRMA BULGULARI **20**

4.1 Amorf $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ İnce Filmlerinin Ölçüm Sonuçları **20**

4.1.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları **20**

4.1.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları 20
4.1.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin Urbach enerjileri 21
4.1.4 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin kalınlık ölçümleri 22
4.1.5 $TlGaS_2$ ince filminin XRD sonucu 24
4.1.6 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma özellikleri 25
4.2 Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filminin Ölçüm Sonuçları 28
4.2.1 Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filminin doğrusal soğurma spektrumu 28
4.2.2 Tavlanmış $TlGaS_2$ ince filminin yasak enerji bant aralığı 29
4.2.3 Tavlanmış $TlGaS_2$ amorf ince filminin Urbach enerjisi 30
4.2.4 Tavlanmış $TlGaS_2$ ince filminin doğrusal olmayan soğurma özellikleri 30
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 32
5.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ Yarıiletken Amorf İnce Filmleri 32
5.2 Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filmi 34
KAYNAKLAR 36
ÖZGEÇMİŞ 38

SİMGELER DİZİNİ

β	İki foton soğurma katsayısı
β_{eff}	Doğrusal olmayan soğurma katsayısı
E_g	Yasak enerji bant aralığı
α_0	Doğrusal soğurma katsayısı
TPA	İki foton soğurması
I_0	Odaktaki şiddet
I_{sat}	Malzemelerin doyuma ulaşma eşik şiddeti
nm	Nanometre
ns	Nanosaniye
ω_0	Odaktaki ısın yarıçapı
z_0	Işının kırınım uzunluğu
T	Geçirgenlik
σ_o	Serbest taşıyıcı soğurma tesir kesiti
ΔN	Serbest taşıyıcı yoğunluğu
E_U	Urbach enerjisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Işık bir madde içerisinden geçerken doğrusal soğurulması 4
Şekil 2. 2 (a) Kendiliğinden ve (b) pompa-gözlem iki foton soğurma sürecinin şematik gösterimi. 5
Şekil 2.3 Doyurulabilir ve tersine doyurulabilir soğurma enerji seviyesi diyagramı (Pramodini 2015). 6
Şekil 3.1 Vakum altında ısısal buharlaştırma yoluyla ince film kaplama sistemi şematik gösterimi (Bilgen, 2015). 11
Şekil 3.2 Vaksis model ısısal buharlaştırma sistemi. 11
Şekil 3.3 Isısal buharlaştırma sistemiyle fused silika altaş üzerine üretilen ince film 12
Şekil 3.4 J.A Woolaam M2000V marka Spektroskobik Elipsometri cihazı. 13
Şekil 3.5 Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi 15
Şekil 3.6 Doğrusal olmayan soğurma eğrisi 17
Şekil 3.7 Doyurulabilir soğurma grafiği 18
Şekil 3.8 Açık yarık Z-tarama deney düzeneğinin şematik gösterimi. 18
Şekil 3.9 XD-1200NT Brother Furnace marka ısıl işlem fırını 19
Şekil 4.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları 20
Şekil 4.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları 21
Şekil 4.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin Ga/In oranına bağlı lnα 'ya karşılık hv grafiği 22
Şekil 4.4 $TlInS_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri 23
Şekil 4.5 $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri 23
Şekil 4.6 $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri 24
Şekil 4.7 $TlGaS_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri 24
Şekil 4.8 $TlGaS_2$ amorf ince filminin XRD grafiği 25
Şekil 4.9 Ga/In oranına bağlı nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği 26
Şekil 4.10 TlGa0.8In0.2S2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği 26
Şekil 4.11 TlGa0.2In0.8S2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği 27

Şekil 4.12 TlGaS2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği 27
Şekil 4.13 $TlInS_2$ ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği 28
Şekil 4.14 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı doğrusal soğurma spektrumu.....29
Şekil 4.15 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı bant aralığı 29
Şekil 4.16 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı lnα' ya karşılık hv grafiği 30
Şekil 4.17 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı açık yarık Z-tarama grafiği.....31

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerin Ga/In oranına bağlı olarak E_g ve E_U değerleri 32

Çizelge 5.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin nanosaniye Z-tarama deneyleri ile elde edilen Ga/In oranına bağlı I_{sat} ve β_{eff} değerleri 33

Çizelge 5.3 $TlGaS_2$ ince filminin tavlama işlemine bağlı nanosaniye açık yarık Z-tarama deneyleri ile elde edilen I_{sat} ve β_{eff} değerleri 34

Çizelge 5.4 $TlGaS_2$ ince filminin tavlama işlemine bağlı olarak E_g ve E_U değerleri 35

1. GİRİŞ

Doğrusal olmayan optik, malzeme ile yüksek şiddetli bir ışığın etkileşmesi sonucu malzemenin optik özelliklerinde meydana gelen değişimlerini inceler (soğurma, yansıma katsayısı, kırılma indisi gibi). Bir malzemenin optiksel özellikleri üzerinde bir değişim meydana getirebilmek için gerekli olan yüksek şiddetli ışığı lazer kaynaklarıyla elde etmek mümkündür. Elektriksel kutuplanma olarak bilinen birim hacim başına indüklenen dipol moment doğrusal olmayan optik olaylarda önemli bir rol oynar. Malzemedeki yüklerin elektromanyetik alan ile etkileşimi alanın faz, frekans, genlik ve kutuplanma gibi özelliklerinin değişmesine neden olur. Franken vd. tarafından 1961'de ikinci harmonik üretiminin keşfedilmesi, doğrusal olmayan optik alanın başlangıcına öncülük eder. Bu çalışmasında 6493 Å dalga boyuna sahip yakut lazer ışığı kuvars kristalinden geçirildi ve ortaya çıkan ışığın mor ötesi bölgesinde yani iletilen ışığın frekansının gelen ışığın frekansının 2 katı olduğunu gözlemledi. Takip eden çalışmalarda, fark frekans üretimi (Smith vd. 1963, Neihuhr 1963), toplam frekans üretimi (Bass vd. 1962), optiksel parametrik yükseltmesi ve salınımı (Giordmaine vd. 1965, Wang vd. 1965,) optiksel düzeltmeler (Bass vd. 1962), üçüncü harmonik üretimi (Terhune vd. 1962) gibi doğrusal olmayan optik olaylar deneysel olarak çalışılmış ve kanıtlanmıştır.

Son yıllarda yüksek teknoloji ürünler için yeni optik malzemeler geliştirmek ve malzemelerin optik özelliklerinin kontrollü olarak değiştirilebilmesi hem bilimsel hem de teknolojik uygulamalar için çok büyük önem kazanmıştır. Optik malzemeler organik malzemeler, karbon tabanlı malzemeler ve nanoparçacıklara kadar çok geniş bir spektrumda olabilir. Optik malzemeler arasında yarıiletken grubu malzemeler opto-elektronik ve elektronik teknolojisinde büyük öneme ve geniş kullanım alanına sahiptir. Bunun yanı sıra fotonik cihazlarda doğrusal olmayan optik malzemeler önemli uygulama alanları bulurlar. Örnek olarak optik sinyal işleme, optik bilgisayarlar, ultra hızlı anahtarlama, atmalı lazerler ve sensörler verilebilir. Optik sınırlama gibi önemli uygulama alanları nedeniyle yarıiletken malzemelerin doyurulabilir soğurma (saturable absorbtion) ve doğrusal olmayan (nonlinear) özellikleri son yıllarda büyük önem kazanmıştır (Kürüm vd. 2010). Yarıiletkenlerde doğrusal olmayan soğurma kullanılan

lazer ışın kaynağının atma başına enerjisi ile incelenecek yarıiletkenin yasak bant aralığı ile ilişkilidir. Lazer ışın kaynağının atma başına enerjisi yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığının tamamından küçük ve yarısından büyük ise ($\frac{E_g}{2} < \hbar\omega < E_g$) doğrusal olmayan soğurma özelliği sergiler (Vodopyanov vd. 1998). Bu durum yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığının katkı veya kusurları içermediği durumlar için geçerlidir. Işığın enerjisi ve bant aralığı eşit olursa, rezonans durumu olur. $E_g < \hbar\omega$ olması durumunda ise doyurulabilir soğurma gözlenebilmektedir.

Düşük doyum soğurması eşik değerine ve büyük doğrusal olmayan soğurma katsayısına sahip malzemeler fotonik uygulamalar için istenen özelliklerdir. Bu tez çalışmasında, $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken kristallerinden (kalkojenit kristaller) üretilmiş olan ince filmler görünür bölgede ışığa karşı yüksek duyarlılık (high photosensitivity) gösterdikleri ve geniş saydamlık aralığına sahip olmaları nedeniyle doğrusal olmayan soğurma ve doyum soğurması özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı soğurma parametrelerini kontrol edebilmek, tavlama ve katkılanma ile nasıl değiştiğini ortaya koymaktır. Periyodik tablonun VI. Grubunda bulunan elementler kalkojen grubu elementler olarak adlandırılır. Galyum (Ga), Germanyum (Ge), Indiyum (In) ve benzeri elementlerin kalkojen grubu elementleriyle yaptığı bileşikler ise kalkojenit olarak adlandırılır. Kalkojenitler güçlü, doğrusal olmayan optik özellikler göstermelerinden dolayı optik anahtarlama gibi birçok uygulamalarda tercih edilmektedir (Zakery 2007).

Bu tez çalışmasının amacı $TlGaS_2$, $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$, $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$ ve $TlInS_2$ içerikli yarıiletkenlerin doğrusal olmayan optik özelliklerinin araştırılmasıdır. Öncelikle külçe (bulk) halindeki yarıiletken kristallerinden oluşan örneklerin ince filmleri ısısal buharlaştırma sistemiyle üretilmiştir. Üretilen ince filmlerin kalınlıkları spektroskobik elipsometre ile belirlenmiştir. Daha sonra UV-VIS spektrometresi ile doğrusal soğurma ölçümleri alınmıştır. Örneklerin doğrusal olmayan optik özellikleri incelemek için 1064 nm dalgaboylu, nanosaniye (ns) atmalı, 10 Hz frekanslı lazer ışın kaynağı kullanılak Z-tarama tekniği ile ölçümler yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Soğurma

2.1.1 Doğrusal soğurma

İlgilenilen malzemenin karakteristik optik özelliklerini belirlemek için önemli parametrelerden biri doğrusal soğurma katsayısının belirlenmesidir. Doğrusal olmayan optik özellikler malzemenin doğrusal soğurmasının 15% den az olduğu dalga boylarında çalışılabilir.

Kalınlığı *d* olan bir malzeme üzerine taban seviyedeki elektronları uyarılmış bir üst seviyeye çıkarabilecek enerjiye sahip olan bir ışık gönderilirse, malzeme gelen ışığın bir kısmını soğurur (Şekil 2.1). Doğrusal soğurma olarak adlandırılan bu olayda gelen ışığın şiddeti çıkan ışığın şiddetine göre daha büyüktür. Beer Lambert Yasasına göre doğrusal soğurma;

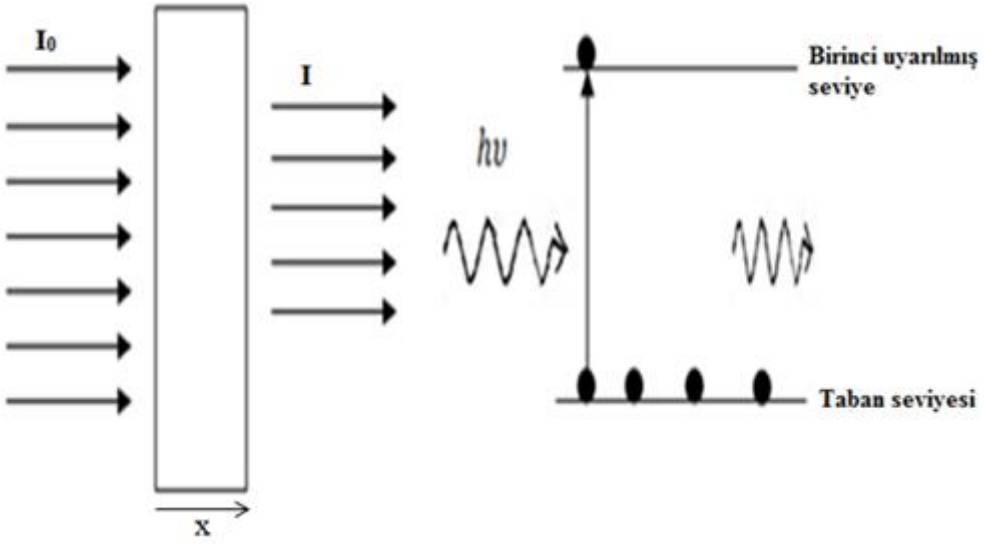
$$I = I_0 e^{-\alpha x} \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilirse çıkan ışığın şiddetinin I_0, α *ve* x*'* e bağlılığı incelenebilir.

Bu ifadede;

- x ise malzemenin kalınlığı
- α doğrusal soğurma katsayısı
- I malzemeyi terk eden ışığın şiddeti
- I_0 malzemeye gelen ışığın şiddetidir

Beer Lambert yasası ışığın şiddetindeki değişikliğin, ışığın malzeme içerisinde aldığı yola bağlı olduğunu vurgular. Burada $I < I_0$ dır. I_0 şiddeti çok yüksek olmadığından, sadece doğrusal soğurma gözlemlenir. Doğrusal soğurma, elektronun tek bir foton aracılığıyla temel seviyeden üst bir seviyeye geçmesiyle gerçekleşir.



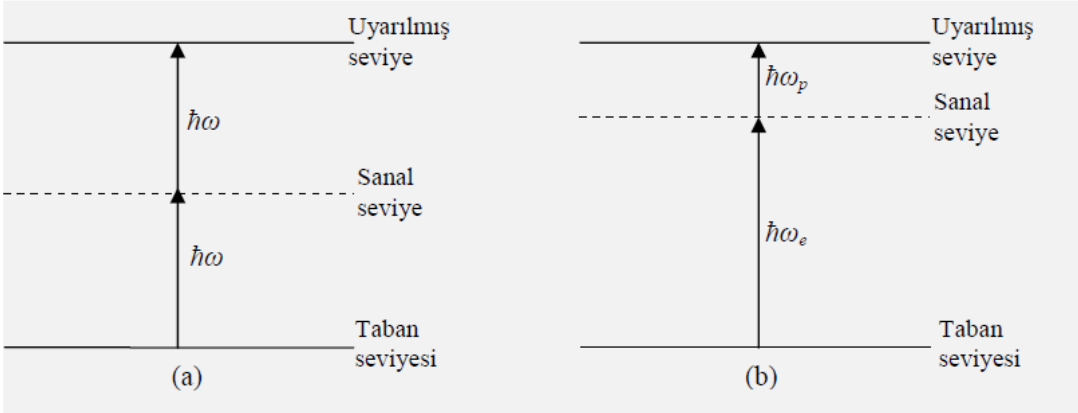
Şekil 2.1 Işık bir madde içerisinden geçerken doğrusal soğurulması

2.1.2 Doğrusal olmayan soğurma

Malzemeye gelen ışığın yüksek şiddetli olduğu ($MW/cm^2<$ mertebesinde) durumlarda doğrusal olmayan soğurma gözlemlenir. Malzeme ile etkileşen ışığın enerji yoğunluğuna ve şiddetine bağlı olarak bir takım değişimler meydana gelir. Yüksek şiddet değerlerinde, elektronların taban seviyelerine dönmeden birden çok foton soğurma yapma olasılığı yükseltilebilir. Lazerin keşfi ile birlikte, birçok malzemenin kendiliğinden iki foton soğurmasının yanı sıra, ayrıca ikiden fazla foton soğurması üzerine geniş ölçüde çalışmalar yapılmıştır. Bunlara ilave olarak, katılarda serbest taşıyıcıların üretilmesi, şiddetli lazer ışınları tarafından indüklenen nüfuslanmanın yeniden düzenlenmesi, kompleks moleküllü sistemlerin ardışık foton soğurulması gibi enerji geçişleri, uyarılmış yayınım ve soğurma çalışmaları yapılmıştır. Geçirgenlik şiddetle birlikte artıyor ise doyurulabilir soğurma, azalıyor ise çoklu foton soğurması, ardışık foton soğurması, serbest taşıyıcı ve uyarılmış durum soğurması olarak nitelendirilir.

2.1.2.1 İki foton soğurması

Gelen radyasyon alanı bir ortamdan geçtiğinde, taban (temel) durumundan daha yüksek bir seviyeye geçiş, iki fotonun aynı anda soğrulmasıyla gerçekleşir. Bu işlem iki foton soğurması (TPA) olarak bilinir.



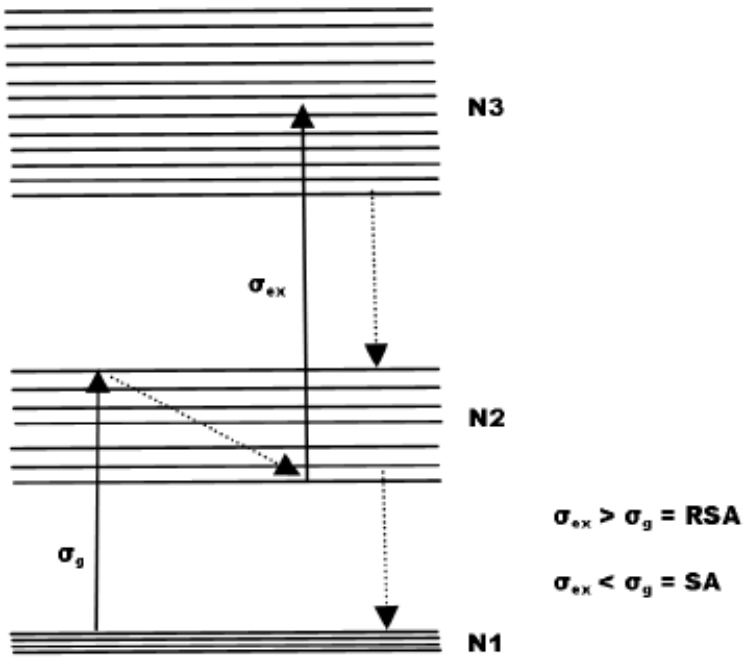
Şekil 2. 2 (a) Kendiliğinden ve (b) pompa-gözlem iki foton soğurma sürecinin şematik gösterimi

Şekil 2.3'de iki foton soğurması için olası iki durum gösterilmektedir; (a)'da geçişin gerçekleşmesi için ω frekansında salınım yapan aynı radyasyon alanından iki foton soğrulur, (b) 'de, iki alanlı pompa ve gözlem ışını bir ortam üzerine gelir ve her bir alandan ω_1 ve ω_2 frekanslı bir foton soğrulur. Şekil 2.2 (a) ve (b) de sanal durum gerçek bir durum değildir (yani gerçek durağan bir durum içermez) ve sistem aynı anda iki foton soğurur. Bu işlem anlık optik yoğunluğa karşı duyarlıdır.

2.1.2.2 Uyarılmış durum (doyurulabilir ve tersine doyurulabilir) soğurması

Doyurulabilir soğurma, artan ışık şiddetiyle ışığın soğrulmasının azaldığı bir malzeme özelliğidir. Işığın şiddeti doyma şiddetinden daha büyükse, uyarılmış seviyeler önemli ölçüde dolar. Yarıiletkenlerde, uyarılmanın gerçekleştiği seviyelerin etrafında bir çok seviye mevcuttur. Uyarılmış elektronlar temel seviyeye geçmeden önce bu seviyelerden birine hızlı bir şekilde geçiş yapabilir. Uyarılmış durumların enerji farkları, gelen foton enerjisi ile yakın rezonans bölgelerindedir. Bu nedenle, elektronlar taban (temel)

durumuna geçmeden önce tekrar soğurma meydana getirebilir ve daha yüksek bir seviye durumuna geçebilir. Bu olaylara uyarılmış durum soğurması (excited state absorption-ESA) denir. Bu tür bir olay gelen ışığın şiddetinin taban durumunu tüketecek kadar yüksek olduğunda meydana gelir. Eğer uyarılmış durumun soğurma ara kesiti, temel durumun soğurma ara kesitinden daha küçükse, yani $\sigma_e << \sigma_g$ ise, sistemin geçirgenliğinde bir artış ortaya çıkar ve bu tip süreçler doyurulabilir soğurma (saturable absorption-SA) olarak adlandırılır. Diğer taraftan, $\sigma_e >> \sigma_g$ olduğunda, sistem daha az geçirgen olacaktır ve bu tür işlemlere tersine (geri) doyurulabilir soğurma (reverse saturable absorption-RSA) denir. Şekil 2.3 doyurulabilir ve tersine doyurulabilir soğurma enerji seviyesi diyagramını göstermektedir (Pramodini 2015).



Şekil 2.3 Doyurulabilir ve tersine doyurulabilir soğurma enerji seviyesi diyagramı (Pramodini 2015)

Yarıiletkenlerde, bir elektron, bant aralığı enerjisinden daha büyük enerjiye sahip olan bir fotonu soğurduğunda, elektron iletim bandına uyarılır ve sıcak elektron olarak adlandırılır. Bu bantta, elektron serbest bir taşıyıcı haline gelir ve bir alanın uygulanmasıyla akıma katkıda bulunabilir. Uyarılan elektron enerjisi kaybederek iletim bandının alt seviyesine iner. Bundan sonra, elektron, karakteristik bir yok oluşum sürecini (recombination time) tamamladıktan sonra değerlik bandının üst seviyesindeki

uyarılmış bir deşik ile yeniden birleşir. Bununla birlikte, gelen ışığın şiddeti yeterince yüksek olduğunda, iletim bandındaki uyarılmış elektron başka bir fotonu soğurabilir. Bu olay serbest taşıyıcı soğurması (Free carrier absorption-FCA) olarak adlandırılır ve tersine doyurulabilir soğurma ile benzerdir (Pramodini 2015).

2.1.2.3 Serbest taşıyıcı soğurması

Yarıiletkenlerin doğrusal soğurma sonucu elde edilen serbest taşıyıcılarının fononlar aracılığı ile iletkenlik bandının daha üst seviyelerine taşınması olayı serbest taşıyıcı soğurması olarak isimlendirilir (Sutherland 2003).

2.2 Amorf Yarıiletkenlerin Doğrusal Olmayan Optik Özellikleri

Amorf yarıiletkenler safsızlık ve kusurlar içerdiklerinden yasak enerji bant aralıklarında birçok seviyeye sahiptirler. İki foton soğurması özelliği göstermelerinin yanında bu kusur seviyelerinden dolayı doyurulabilir soğurma, serbest taşıyıcı soğurması ve tek foton soğurması özellikleri gösterebilirler. Işığın malzeme içerisinde ilerlerken şiddetindeki değişim bu etkilerin hepsini kapsayacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir (Yüksek vd. 2010):

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{\alpha I}{1 + I/I_{sat}} - \frac{\beta I^2}{1 + I^2/I_{sat}^2} - \frac{\sigma_o \Delta N I}{1 + I^2/I_{sat}^2} \tag{2.2}$$

Burada;

- α tek foton soğurma katsayısı
- β iki foton soğurma katsayısı
- ΔN serbest taşıyıcı yoğunluğu
- σ_o serbest taşıyıcı soğurma tesir kesiti
- I_{sat} doyurulabilir soğurma eşik şiddetidir.

Denklem (2.2)'de 1.terim tek foton soğurmasını ve doyurulabilir durumunu, 2.terim iki foton soğurması ve doyurulabilir durumunu, 3.terim ise serbest taşıyıcı soğurmasını ve doyurulabilir durumunu ifade eder.

Lazer atma süresinin serbest taşıyıcıların uyarılmış durumda kalma sürelerinden daha kısa olması durumunda serbest taşıyıcı yoğunluğu;

$$\Delta N = \frac{\alpha \tau_0}{\hbar \omega_0} I \tag{2.3}$$

şeklinde ifade edilir. Etkin doğrusal olmayan soğurma katsayısı ise;

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sigma_o \alpha \tau_0}{\hbar \omega_0} \tag{2.4}$$

şeklinde ifade edildikten sonra (2.2) eşitliği;

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{\alpha I}{1 + I/I_{sat}} - \frac{\beta_{eff} I^2}{1 + I^2/I_{sat}^2} = f(I) \tag{2.5}$$

formunu alır. (2.5) eşitliği Adomian ayrıştırma yöntemi kullanılarak (Adomian, 1974) malzemeye gelen ışık şiddeti I_G ve malzemeyi terk eden ışık şiddeti $I_Ç$ cinsinden;

$$I_Ç = I_G - \int_0^L f(I)\, dz \tag{2.6}$$

integral formunu alır. Burada L malzemenin kalınlığıdır. Çıkan ışığın şiddeti Adomian polinomları cinsinden ifade edilirse normalize geçirgenlik malzemenin göreli konumunun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$T(x, L) = \frac{\int_0^\infty I_Ç(x, t) r\, dr}{e^{-\alpha_0 L} \int_0^\infty I_G r\, dr} \tag{2.7}$$

Burada;

- z malzemenin konumu
- $z_o = \pi\omega_0{}^2/\lambda$ Rayleigh uzunluğu
- $x = z/z_0$ malzemenin göreli konumu
- λ kullanılan lazerin dalga boyudur.

Gaussian atma demeti için zamansal profil $h(t) = exp[-(t/t_0)^2]$ şeklinde ifade edilir ve (2.7) eşitliği tekrar düzenlenirse açık yarık Z-tarama deneyi için ifade;

$$T(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} T(x,t)\, h(t)\, dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h(t)\, dt} \tag{2.8}$$

şeklini alır.

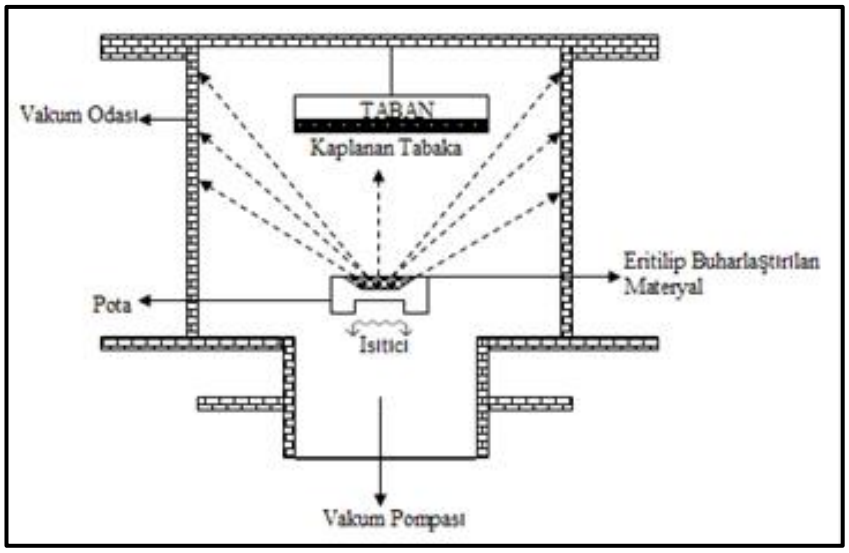
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında kullanılan cihazlar bölümümüz bünyesindeki Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunmaktadır ve aşağıda kısaca bilgileri verilmiştir.

3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma

Isısal buharlaştırma işlemi, sadeliği nedeniyle çok kullanılan buhar biriktirme tekniğidir. Bu işlem sırasında, yüksek vakumlu bir ortamda bulunan bir malzeme, içinde bulunduğu elektriksel dirence sahip bir kaşığın üzerinden akım geçirilerek buharlaşma noktasına kadar ısıtılır. Buharlaşan moleküller daha sonra bir alttaşa doğru ilerleyerek alttaş yüzeyinde ince bir film katmanı oluşturur. Şekil 3.1'de vakum altında ısısal buharlaştırma yoluyla kaplama sisteminin şematik gösterimi verilmektedir.

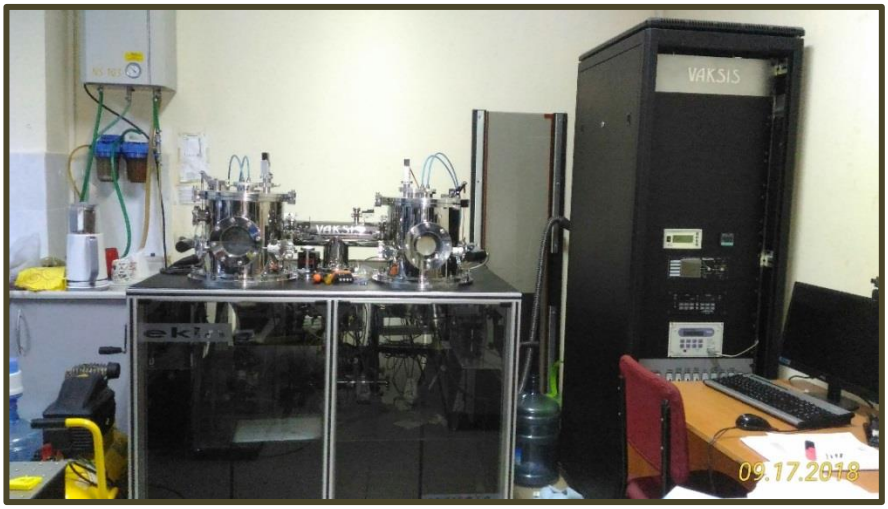
Yüksek vakum, iki sebepten dolayı dirençli buharlaşma işlemleri için kritik öneme sahiptir; birincisi, gaz bir odadan boşaltıldığında içindeki buhar molekülleri bir gaz molekülü ile çarpışmadan önce daha uzun mesafelere gidebilir. Buharlaşma sırasında gaz molekülleriyle çarpışmalar istenmez, çünkü malzeme buharının hareket yönünü değiştirir, bu da alttaş üzerinde oluşacak olan ince filmin yapısını olumsuz etkiler. Gaz basıncı 10^{-5} Torr'un altında olduğunda, bir gaz molekülü ile çarpışmadan önce bir buhar molekülünün ortalama hareket mesafesi (ortalama serbest yolu) 1 metreden daha büyüktür, ki bu tipik olarak hazne boyutlarından daha büyüktür. Bu, moleküllerin kaynağından alttaşa doğrusal bir yol üzerinde gideceği ve dirençli buharlaşmayı büyük ölçüde yönlü hale getireceği anlamına gelir. İkincisi, yüksek vakum ayrıca ince film saflığı için önemlidir. Eğer vakum odasında arkaplan gazları (background gases) var ise büyüyen filmin kontamine olmasına sebep olabilir. Bu da üretilmek istenilen ince filmler için istenmeyen bir durumdur. Bu, gazların kısmi basıncının 10^{-5} Torr aralığının altına pompalanmasıyla, buharlaşmış filmlerin saflığı büyük ölçüde iyileştirilir.



Şekil 3.1 Vakum altında ısısal buharlaştırma yoluyla ince film kaplama sistemi şematik gösterimi (Bilgen 2015)

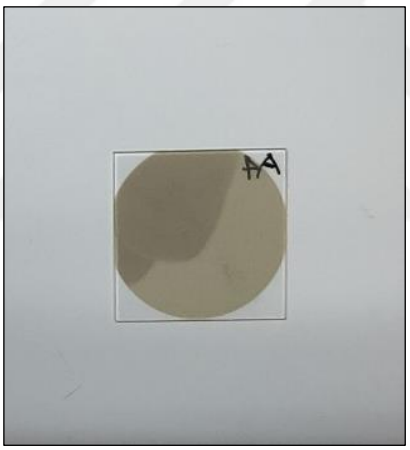
3.1.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ yarıiletkenlerin ince filmlerinin üretilmesi

$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ yarıiletken külçe kristallerinden ince filmlerinin büyütülmesi amacıyla bölümümüz bünyesindeki Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan VAKSİS PVD-handy Twin Çift Vakum Odalı Isısal Buharlaştırma Sistemi (Şekil 3.2) kullanıldı.



Şekil 3.2 Vaksis model ısısal buharlaştırma sistemi

$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmleri için sistemin sağladığı ve bilgisayar yoluyla kontrol edilebilen büyütme hızı ve basınç gibi parametrelerin değiştirilmesi yoluyla istenilen özelliklerde elde edilmiştir. İnce film üretme işleminde ısı kaynağı olarak tungsten kaşık kullanıldı. Filmlerin üzerine büyütüleceği SiO_2 alt-taş tungsten kaşıktan yaklaşık 12 cm yukarıya yerleştirildi. Sonraki aşamada vakum odasının havası boşaltılarak $5x10^{-5}$ Torr basınca ulaşılınca film kaplama işlemi başlatıldı. Tungsten kaşık, üzerinden elektrik akımı kontrollü bir şekilde geçirilerek ısıtıldı. Üretilen ince filmler 30-35A (bu akım değerlerinde basınç $4{,}1.10^{-5}$ - $5{,}7.10^{-5}$ Torr aralığında idi) aralığında aniden buharlaştıktan sonra akım küçük aralıklarla büyütme hızı 0.6 Å/s olacak şekilde yavaş yavaş arttırıldı ve istenilen kalınlık değerlerine ulaşılana kadar bu işleme devam edildi. Şekil 3.3'de ısısal buharlaştırma sistemiyle fused silika (SiO_2) üzerinde üretilen ince filmler gösterilmektedir.



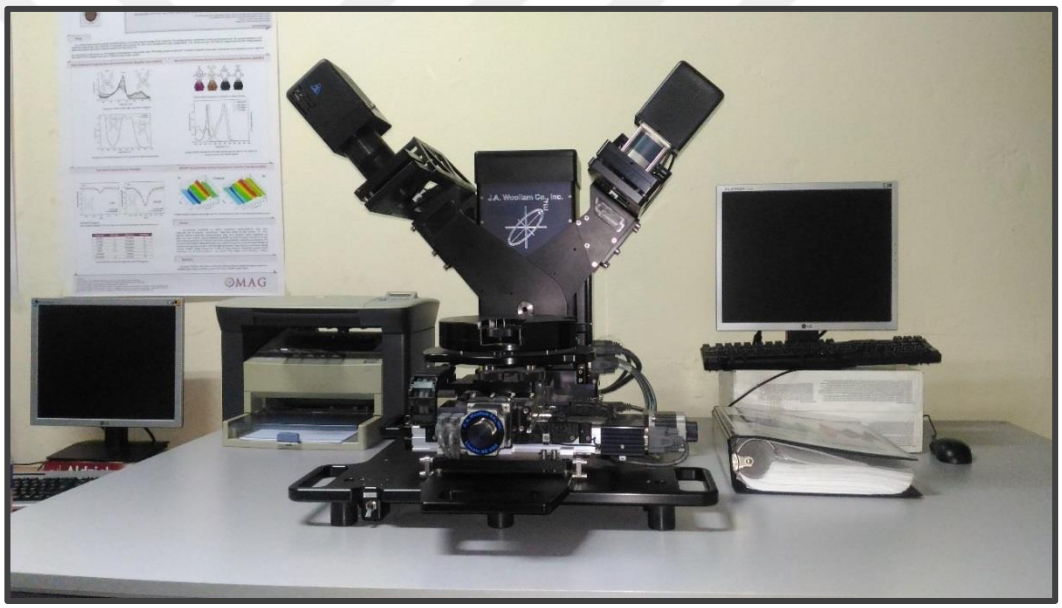
Şekil 3.3 Isısal buharlaştırma sistemiyle fused silika altaş üzerine üretilen ince film

3.2 Spektroskobik Elipsometre

Elipsometri, ince filmlerin yapılarını karakterize etmek için doğrusal kutuplu bir ışık kullanılan çok hassas bir ölçüm tekniğidir. Spektroskopik elipsometre'de malzemenin şekline veya boyutuna zarar gelmeyecek şekilde ölçümler gerçekleştirilebilir. Elipsometre, ışığın bir malzemeden yansıdığında kutuplanmasındaki değişimi esas alır. Polarizasyon değişimi, doğrusal kutuplu ışığı eliptik kutuplu hale dönüştürür ve ayrıca yansıyan ışık demeti analiz edilerek malzeme hakkında çeşitli bilgiler elde edinilebilir.

En yaygın uygulamaları olarak ince filmlerin kalınlığının ve optik sabitlerinin belirlenmesidir. Kullanılan ışık kaynağının dalga boyuna bağlı olarak UV, görünür ve IR dalgaboyu aralığında optik sabitleri belirlemek için kullanılanılabilir. Elipsometri kullanılarak; optiksel sabitler (n, k ya da ε_1 , ε_2), ince film kalınlıkları (tek veya çok katmanlı), alaşım oranları, kristallilik, optiksel anizotropi, malzeme özelliklerinin derinlik profili belirlenebilir.

$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmlerinin kalınlıklarını belirlemek için Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan şekil 3.3' de gösterilen J.A Woolaam M2000V marka Spektroskobik Elipsometri cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.4 J.A Woolaam M2000V marka Spektroskobik Elipsometri cihazı.

3.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ (0≤x≤1) Yarıiletken İnce Filmlerinin Doğrusal Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji Bant Aralıklarının Belirlenmesi

Yarıiletkenlerin, en düşük iletim bandı seviyesi ve en yüksek değerlik bandı seviyesi arasında kalan ayrımına bant aralığı, enerji aralığı veya yasak enerji aralığı (E_g) adı verilir.

Amorf yapıdaki yarıiletken ince filmlerin doğrusal soğurma katsayıları için soğurma katsayısına bağlı olarak iki durum söz konusudur. İlk durumda, soğurma katsayısı 10^4 $cm^{-1} < \alpha$ olduğunda denklem 3.1 kullanılırken, $1 < \alpha < 10^4$ cm^{-1} olduğunda denklem 3.2 kullanılmaktadır (Pankove 1971, Quasrawi 2005).

$$\alpha = \frac{A}{hv}(hv - E_g)^n \tag{3.1}$$

$$\alpha = \alpha_0 \exp(^{hv}/_{E_U}) \tag{3.2}$$

Burada a_0 bir sabittir, hv foton enerjisi ve E_U yerelleşmiş seviyelerin bant kuyruğunun genişliğini temsil eder.

Yasak enerji bant aralığının belirlenmesinde soğurma katsayısı (a) ve fotonun enerjisi (hv) olmak üzere amorf yarıiletkenler için denklem (3.1) kullanılarak foton enerjisine karşılık $(ahv)^n$ grafiği çizilir. İzinli dolaylı geçişler için n = 2 alınır.

$$(ahv)^{1/n} = A^{1/n}(hv - E_g) \tag{3.3}$$

Çizilen grafikten yasak enerji aralığının belirlenmesi üzerine (3.3) denklemi düzenlendiğinde soğurma kenarından geçen doğrunun x eksenini kestiği noktada $(ahv = 0\ için)$ yasak enerji aralığının değerinin $(E_g = hv)$ bulunabileceği görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma özellikleri Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvar'ında bulanan Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi (Şekil 3.4) ile analiz edilmiştir. Bu UV-spektrometresi ile morötesi ve kızılötesi (190 nm – 1100 nm) aralığındaki bölgenin doğrusal soğurma spektrumu analiz edilebilmektedir. Üretilen ince filmlerin doğrusal soğurma spektrumları alınırken alttaştan gelen etkileri ortadan kaldırmak için spektrometrenin referans ve örnek haznesi içerisine fused silika alttaşlar koyularak ilgilenilen dalga boyu aralığında tarama yapıldı ve bu suretle baseline alındı. Bu işlemden sonra örnek haznesindeki fused silika alttaş üzerine ince film kaplanmış alttaş ile değiştirilerek ölçümler yapıldı.



Şekil 3.5 Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi

3.4 Urbach Enerji Değerlerinin Belirlenmesi

Kristal yapıya sahip olmayan birçok yarıiletkende soğurma katsayısı α foton enerjisine bağlıdır. Bant kenarına yakın bölgede soğurma katsayısı ve foton enerjisi arasındaki ilişki Urbach kuralına göre tanımlanır,

$$\alpha = \alpha_0 \exp(\frac{hv}{E_U}) \tag{3.4}$$

$$ln\alpha = ln\alpha_0 + (\frac{hv}{E_U}) \tag{3.5}$$

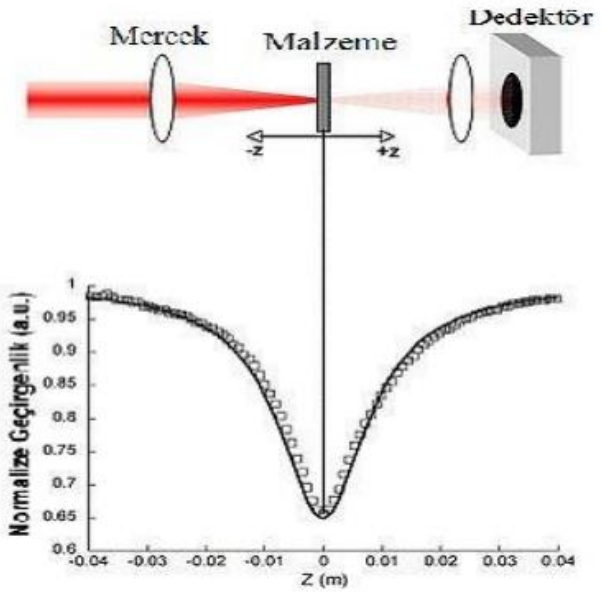
Burada α_0 bir sabit, hv gelen fotonun enerjisi ve E_U bant aralığındaki yerelleşmiş seviyelerin bant kuyruğunun genişliğini (Urbach enerjisi) temsil eder. (3.4) denkleminin düzenlenmesiyle $ln\alpha$ 'ya karşılık hv grafiğinin çizilmesiyle elde edilen doğrunun eğiminin tersi Urbach enerjisine karşılık gelir.

3.5 Açık yarık Z-tarama deneyi

Z-tarama deneyi ilgilenilen örneğin Gaussian lazer demetinin mercek odağı etrafında hareket ettirilmesine dayanır. Örneğin doğrusal olmayan soğurması odağa yaklaşırken ve uzaklaşırken ışığın şiddetine bağlı olarak değişir. Geçirgenliğinin z-konumunun bir fonksiyonu olarak ölçülmesi sonucu ışık-madde etkileşimi hakkındaki bilgiler elde edilebilir. Bu şekilde belirlenebilecek iki doğrusal olmayan etkileşim, örneğin doğrusal olmayan kırılma indisi ve doğrusal olmayan soğurma katsayısıdır. Bu tez çalışmasının kapmasına doğrusal olmayan kırılma indisi girmediği için kapalı yarık Z-tarama deneyinden bahsedilmeyecektir.

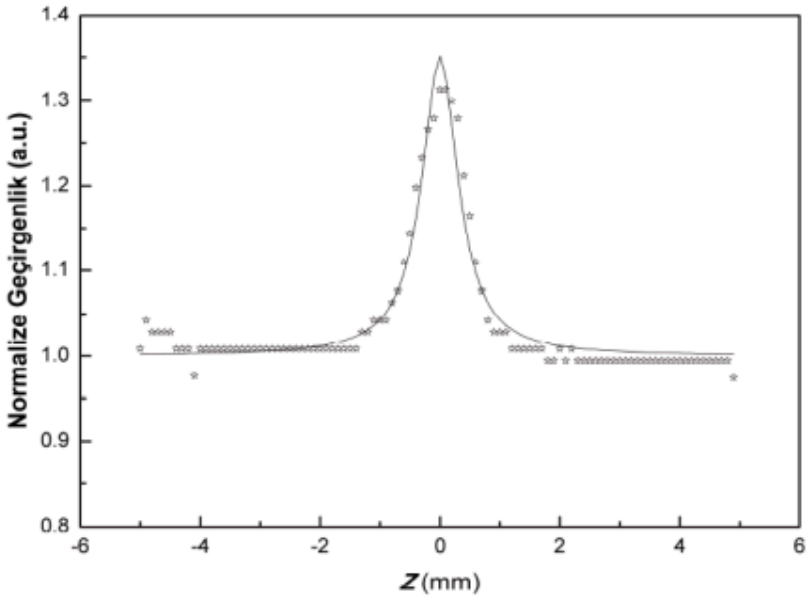
Doğrusal olmayan soğurma, ortamın geçirgenliğinin şiddetin bir fonksiyonu olarak değişimini ifade eder. Açık yarık Z-tarama deneyi (Şekil 3.7) gerçekleştirilerek ortamın doğrusal olmayan soğurma katsayısı β hesaplanabilir. Numunenin odak yani şiddetin en yüksek olduğu nokta etrafında hareket ettirilmesiyle malzemenin geçirgenliğinde iki durum gözlemlenebilir. Bunlardan ilki uzak bölgeden odağa doğru yaklaşıldıkça yeterli şiddete ulaşıldığında malzemenin geçirgenliğinde azalmalar meydana gelmesidir. Odak üzerinde bu azalma en yüksek değerini alır ve tekrar odaktan uzaklaşıldığında örneğin geçirgenliği artmaya başlar. Şiddetin doğrusal olmayan soğurma gerçekleştirmek için yeterli olmadığı konuma gelindiğinde sadece doğrusal soğurmalar meydana gelebilir. Örneğin odak noktasına yaklaştıkça geçirgenliğinde meydana gelen bu azalma eğilimine doğrusal olmayan soğurma denir. Dedektör tarafından algılanan enerji değerlerinin en

yüksek olanı 1 olacak şekilde normalize edilmesiyle normalize geçirgenliğin konuma bağlı değişimi şekil 3.5' deki gibi görülmektedir.

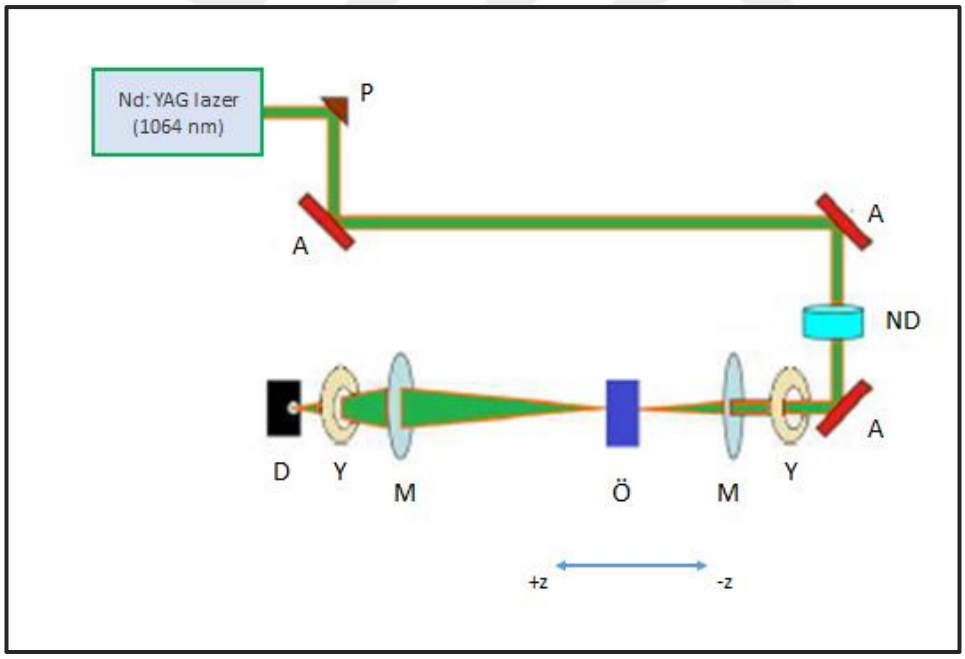


Şekil 3.6 Doğrusal olmayan soğurma eğrisi

İkinci durum uzak bölgeden odağa doğru yaklaşıldıkça yüksek şiddetlerde malzemenin geçirgenliğinde artış meydana gelmesidir. Odak üzerinde bu artma en yüksek değerini alır ve tekrar odaktan uzaklaşıldığında numunenin geçirgenliği azalmaya başlar. Odak noktasına yaklaşıldıkça meydana gelen geçirgenlikteki bu artış eğilimine doyurulabilir soğurma denir. Dedektör tarafından algılanan enerji değerlerinin en düşük değer 1 olacak şekilde normalize edilmesiyle geçirgenliğin konuma bağlı değişimi şekil 3.6' deki gibi görülmektedir.



Şekil 3.7 Doyurulabilir soğurma grafiği



Şekil 3.8 Açık yarık Z-tarama deney düzeneğinin şematik gösterimi

(P: prizma, A: ayna ND: döner optik yoğunluk filtresi, Y: yarık, M: ince kenarlı mercek, D: dedektör)

3.6 Yarıiletken İnce Filmlere Isıl İşlem Uygulanması

$TlGaS_2$ yarıiletken ince filmi için Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan XD-1200NT Brother Furnace marka ısıl işlem fırınında (Şekil 3.8) 473 K 'de 30 dakika ısıl işlem uygulanmıştır. Doğrusal soğurma ve Z-tarama deney sonuçları araştırma bulgular kısmında verilmektedir.



Şekil 3.9 XD-1200NT Brother Furnace marka ısıl işlem fırını

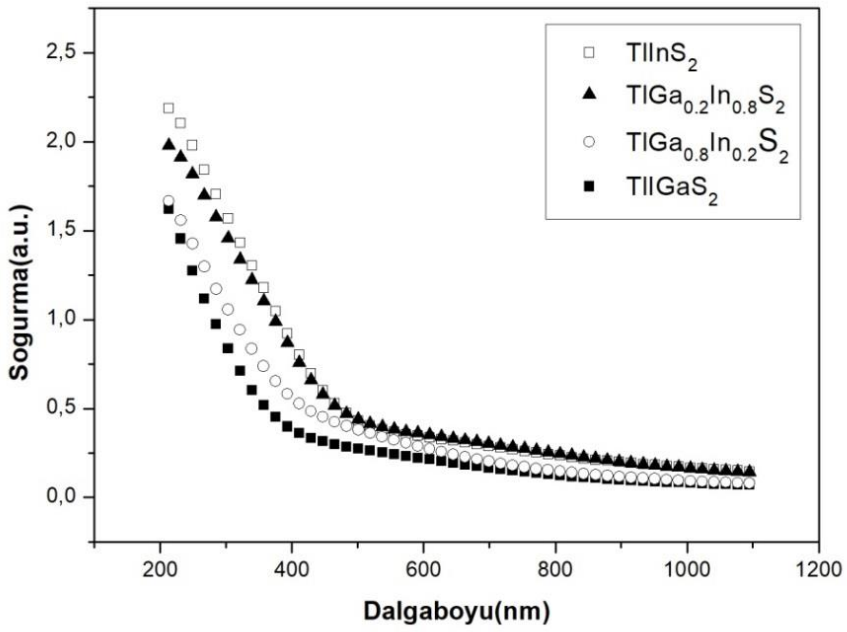
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez kapsamında ısıl buharlaştırma yöntemi ile kaplanan $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0 \leq x \leq 1)$ yarıiletken ince filmlerin doğrusal optik özellikleri, yapıları, tavlamanın yapı üzerine etkisi ve doğrusal olmayan optik soğurma özellikleri incelendi. Elde edilen deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.1 Amorf $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ İnce Filmlerinin Ölçüm Sonuçları

4.1.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları

İnce filmler Shimadzu UV-1800 spektrometre ile analiz edilmiştir ve şekil 4.1'deki doğrusal soğurma spektrumları elde edilmiştir.

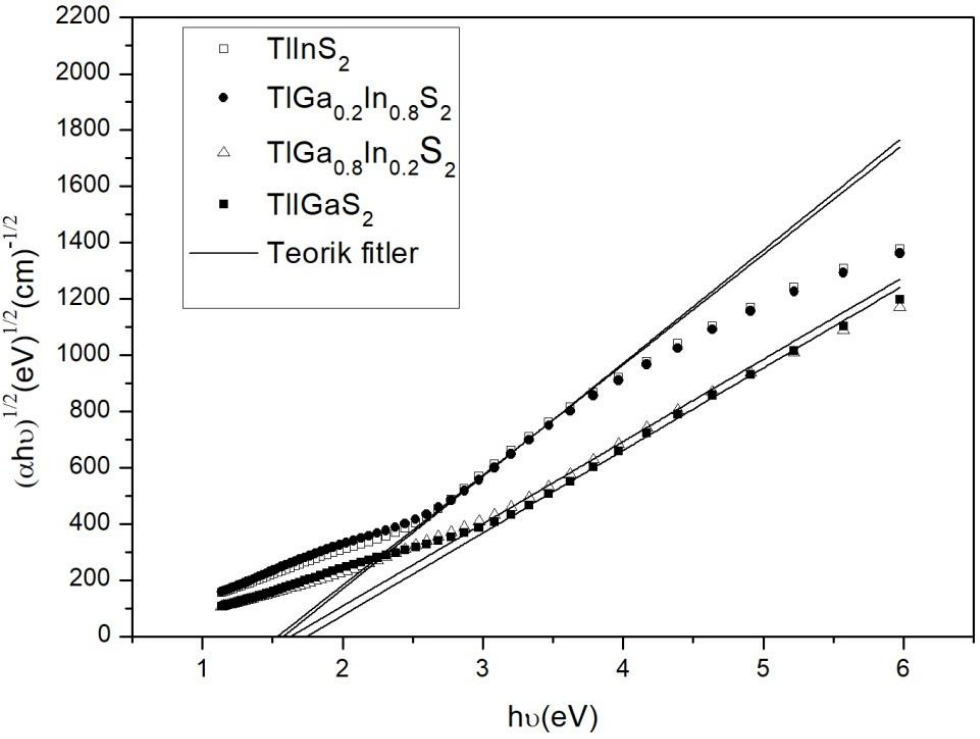


Şekil 4.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ $(0\leq x\leq 1)$ ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları

4.1.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0\leq x\leq 1)$ yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları

Yarıiletken amorf ince filmlerin doğrusal soğurma spektrumundan alınan veriler ile yasak enerji bant aralıkları hesaplandı. Bant aralığı belirlenmesinde n = 2 (m = 1/2)

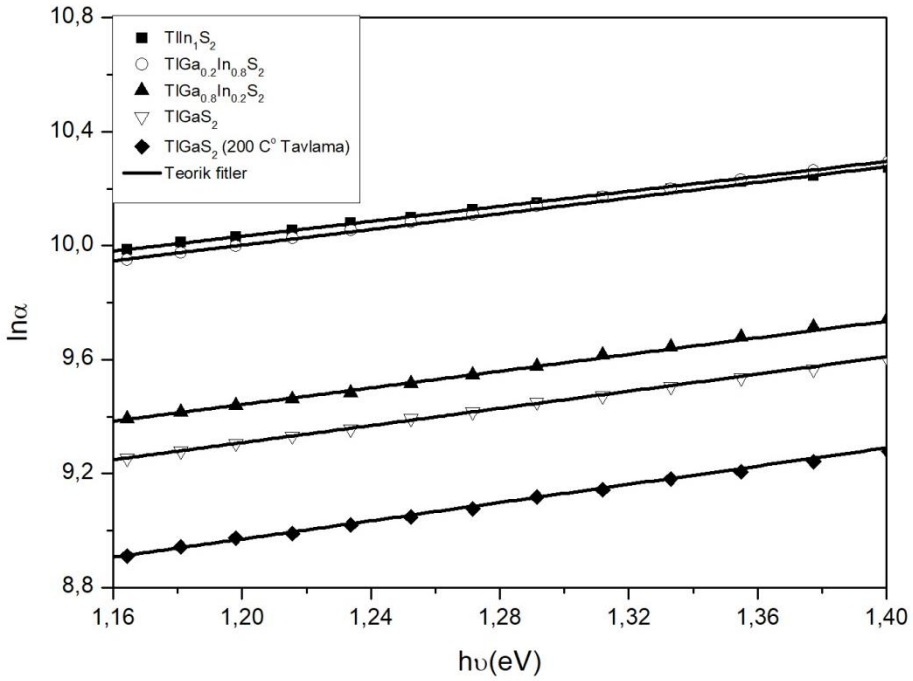
alınarak çizilen grafiklerde doğrusal bir rejim görülerek dolaylı bant geçişleri meydana geldiği saptanmış ve bant aralıkları hesaplanmıştır. Bant aralıkları şekil 4.2'de gösterilmektedir. Gösterilen grafikten bant aralıkları $TlInS_2$, $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$, $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ ve $TlGaS_2$ için sırasıyla 1.54, 1.58, 1.64 ve 1.76 eV olarak bulunmuştur.



Şekil 4.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ ($0 \leq x \leq 1$) yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları

4.1.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin Urbach enerjileri

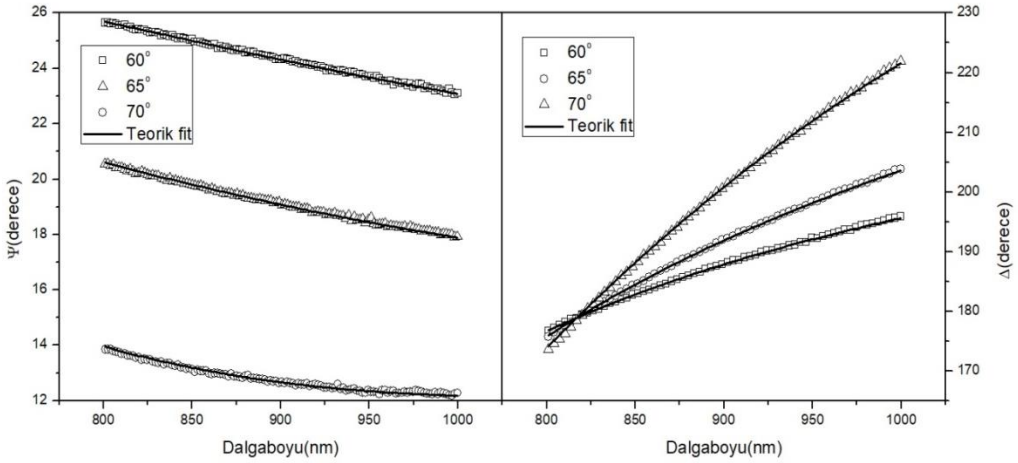
Doğrusal soğurma spektrumundan alınan veriler yardımıyla ince filmlerin Urbach enerjileri belirlendi. (3.5) denklemi kullanılarak soğurma kenarına yakın bölgede $ln\alpha$ ' ya karşılık hv grafiği şekil 4.3'de gösterildiği şekilde çizildi. Çizilen grafiklerde doğruların eğimlerinin tersi alınarak Urbach enerjileri $TlInS_2$, $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$, $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ ve $TlGaS_2$ için sırasıyla 0.80, 0.71, 0.68, 0,66 eV olarak bulundu.



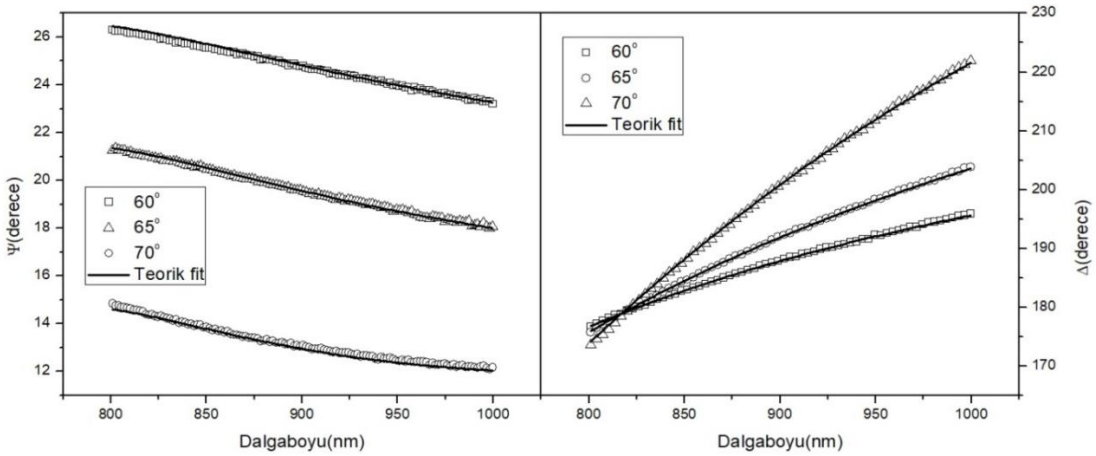
Şekil 4.3 $TlGa_xIn_{(1-x)}S2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin Ga/In oranına bağlı lnα 'ya karşılık hv grafiği

4.1.4 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin kalınlık ölçümleri

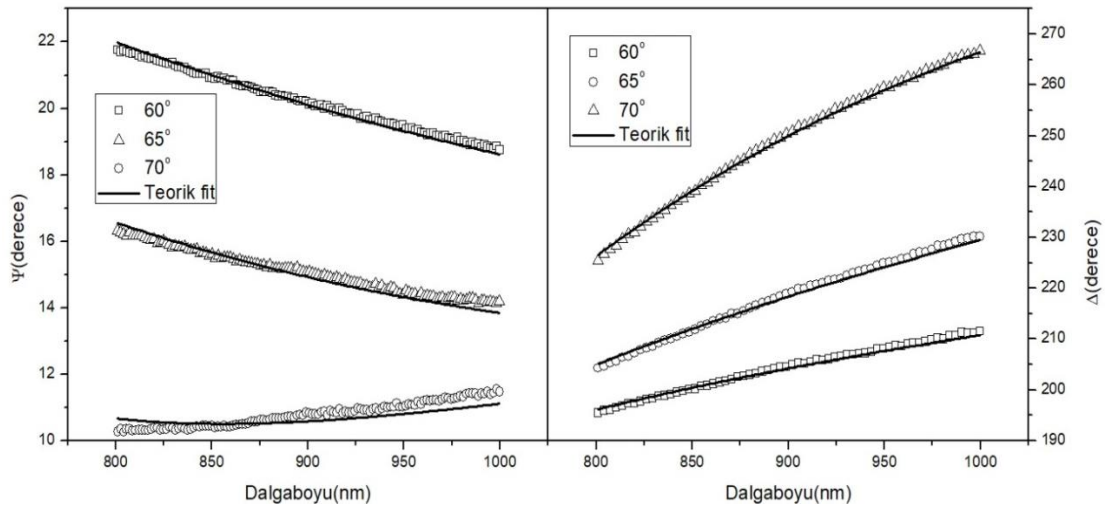
Amorf yapıda olduğu belirlenen ince filmlerin sonraki adımda kalınlıkları tespit edilmek üzere spektroskopik elipsometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kalınlıkların hesaplanmasında kullanılan ψ ve Δ parametrelerin dalgaboyuna bağlı grafikleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. İncelenen ince filmlerin kalınlıkları 70 nm olarak belirlenmiştir.



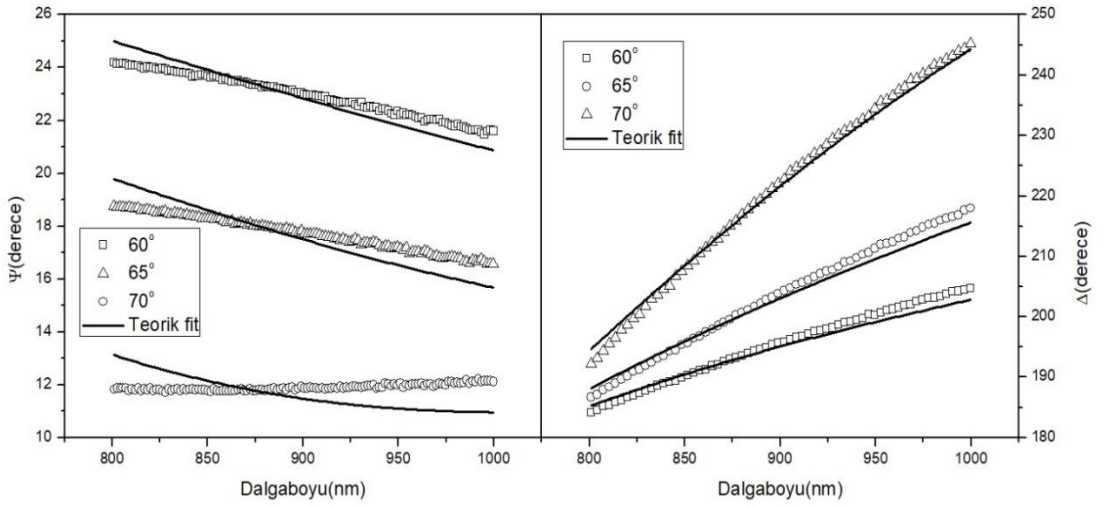
Şekil 4.4 $TlInS_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri



Şekil 4.5 $TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri



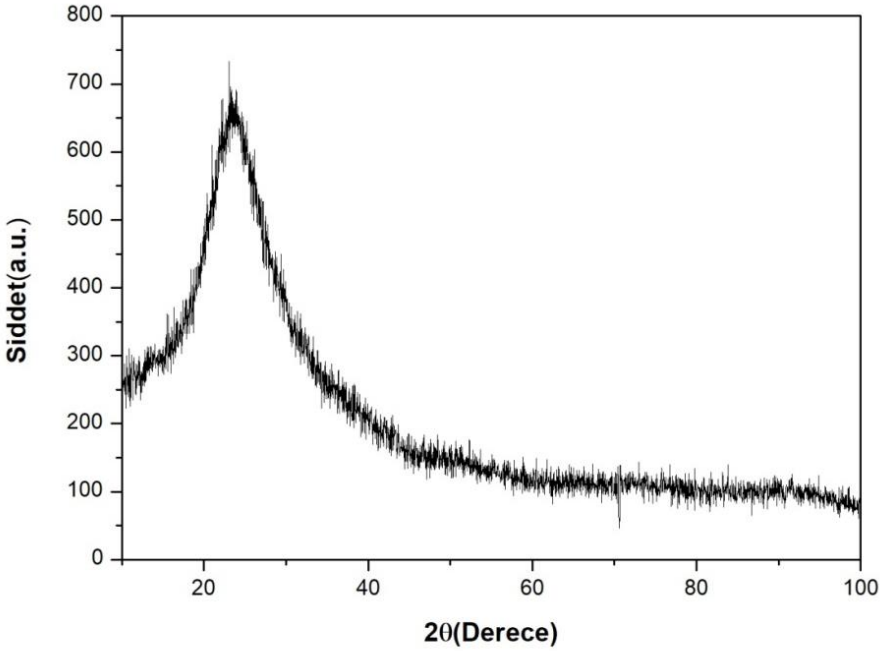
Şekil 4.6 $TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri



Şekil 4.7 $TlGaS_2$ amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri

4.1.5 $TlGaS_2$ ince filminin XRD sonucu

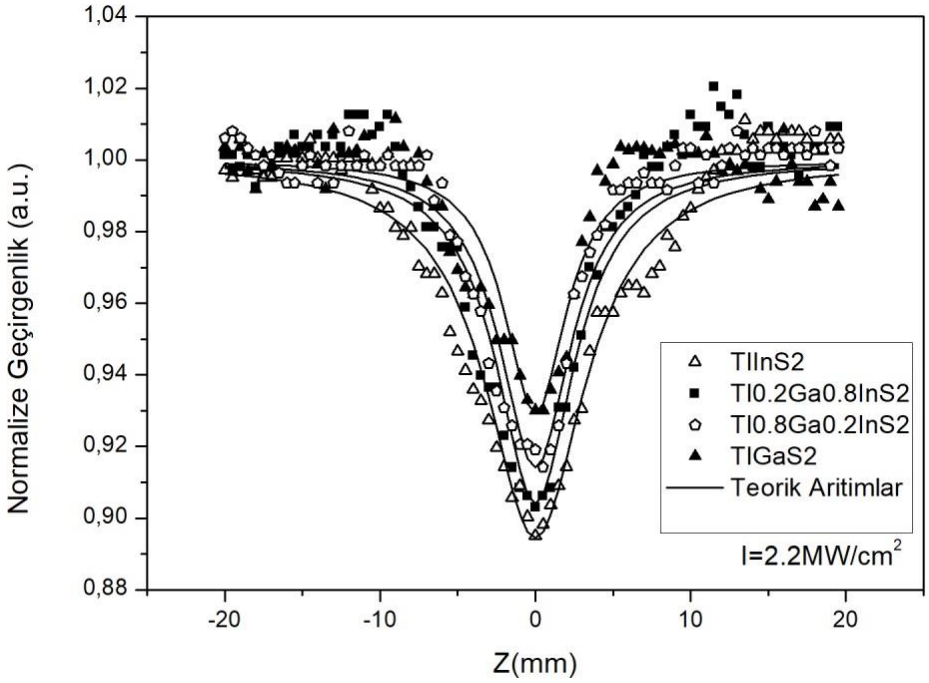
$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin yapılarının belirlemek için X-ışını kırınımı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak olarak Cu K_α ışınları kullanılmış ve 2θ = 0-100^o aralığında ölümler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üretilen tüm filmlerin amorf yapıda olduğunu göstermiştir. 70 nm kalınlığa sahip $TlGaS_2$ ince filminin XRD grafiği şekil 4.8'de gösterilmektedir.



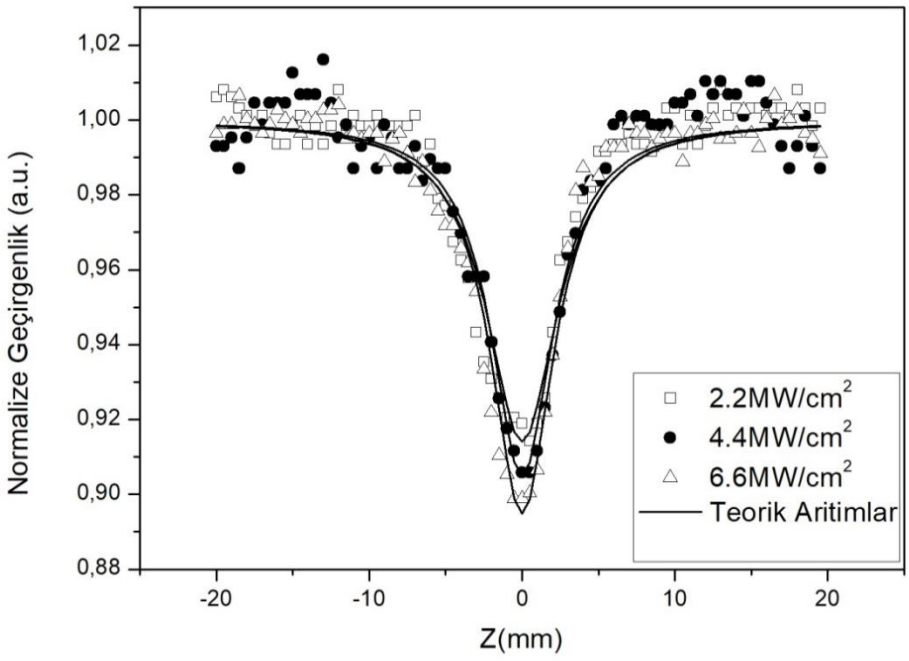
Şekil 4.8 $TlGaS_2$ amorf ince filminin XRD grafiği

4.1.6 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0 \leq x \leq 1)$ ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma özellikleri

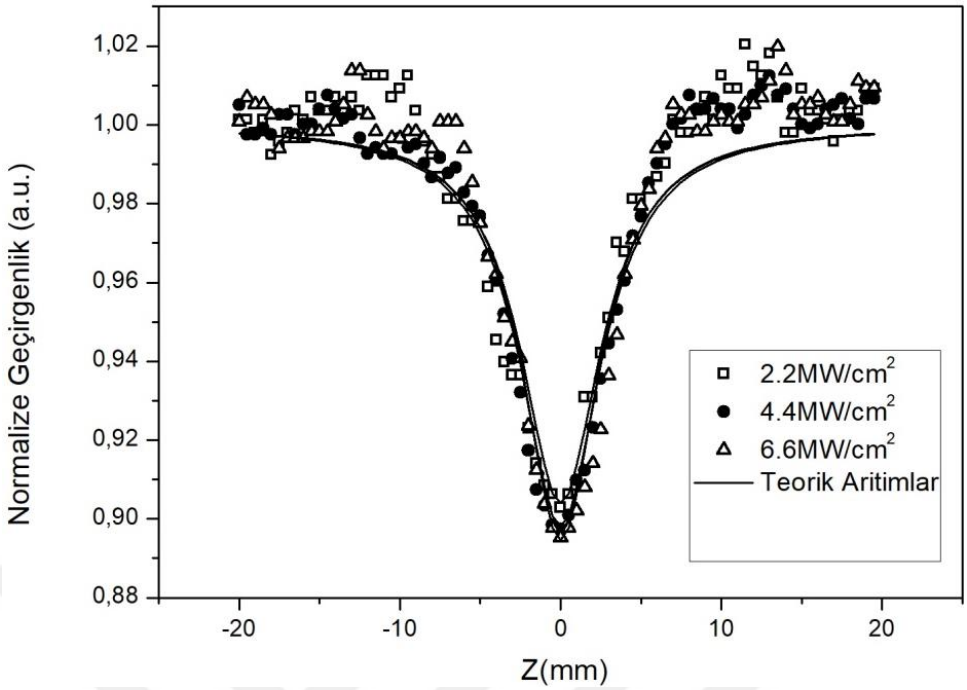
$TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0 \leq x \leq 1)$ ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma özellikleri 4 nanosaniye atma süreli lazer ile incelendi. Gerçekleştirilen Z-tarama deney sonuçlarının arıtımı ile elde edilen doğrusal olmayan soğurma verileri şekil 4.9-13'de grafik formatında verilmektedir.



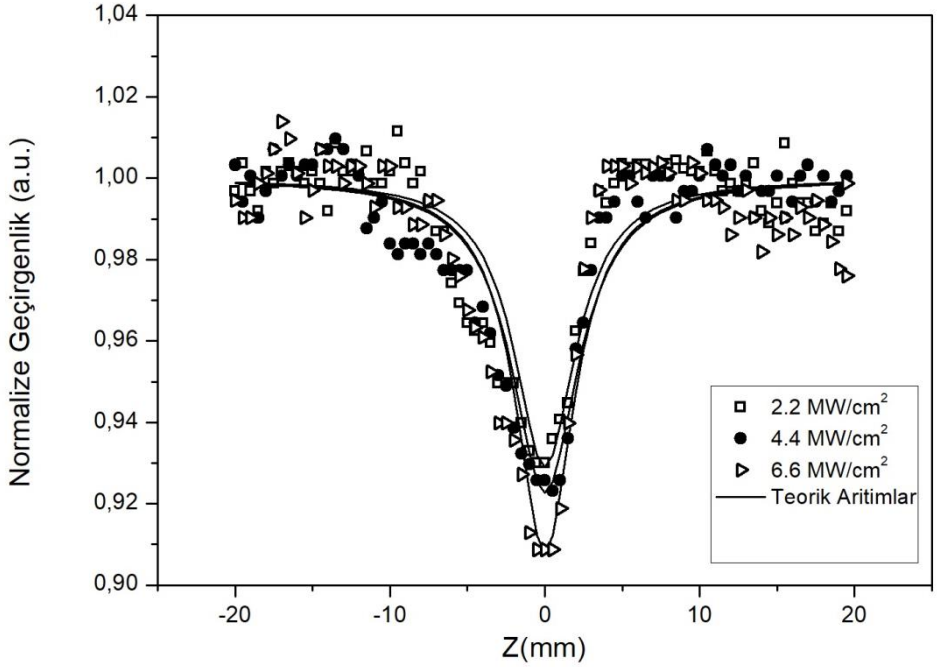
Şekil 4.9 Ga/In oranına bağlı nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği



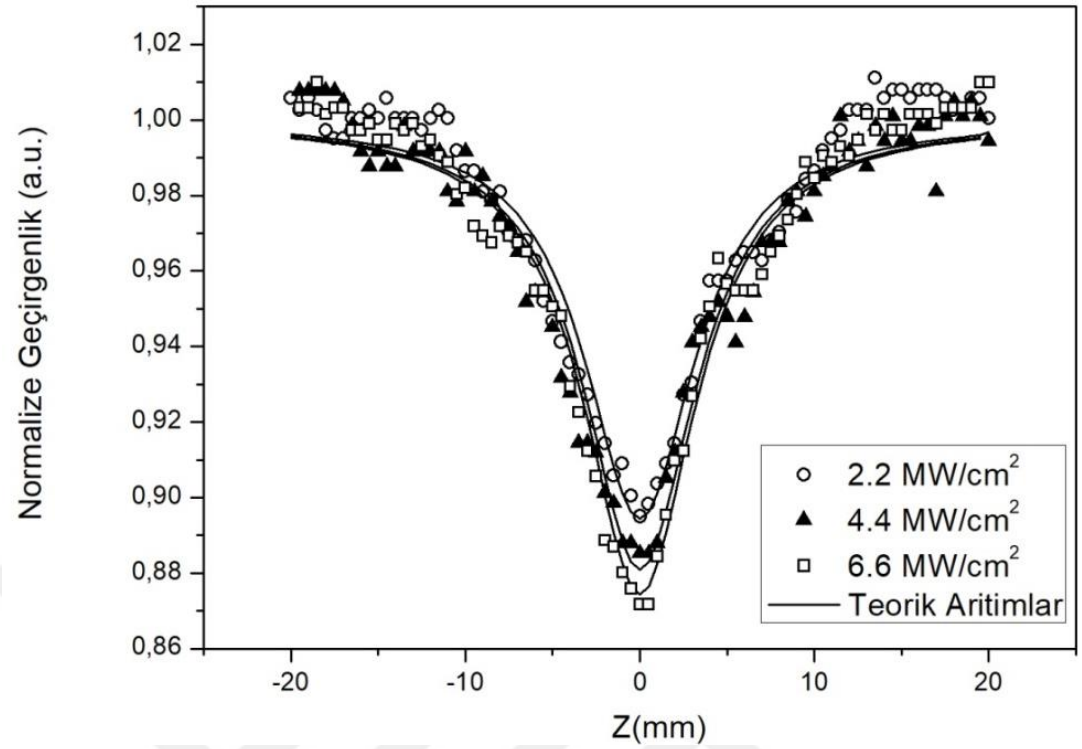
Şekil 4.10 TlGa0.8In0.2S2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği



Şekil 4.11 TlGa0.2In0.8S2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği



Şekil 4.12 TlGaS2 ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği

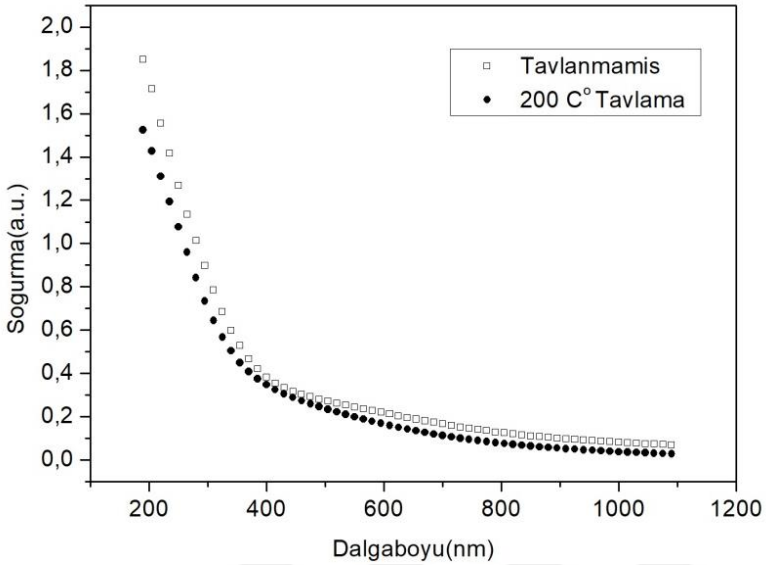


Şekil 4.13 $TlInS_2$ ince filminin farklı şiddetlere göre açık yarık Z-tarama grafiği

4.2 Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filminin Ölçüm Sonuçları

4.2.1 Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filminin doğrusal soğurma spektrumu

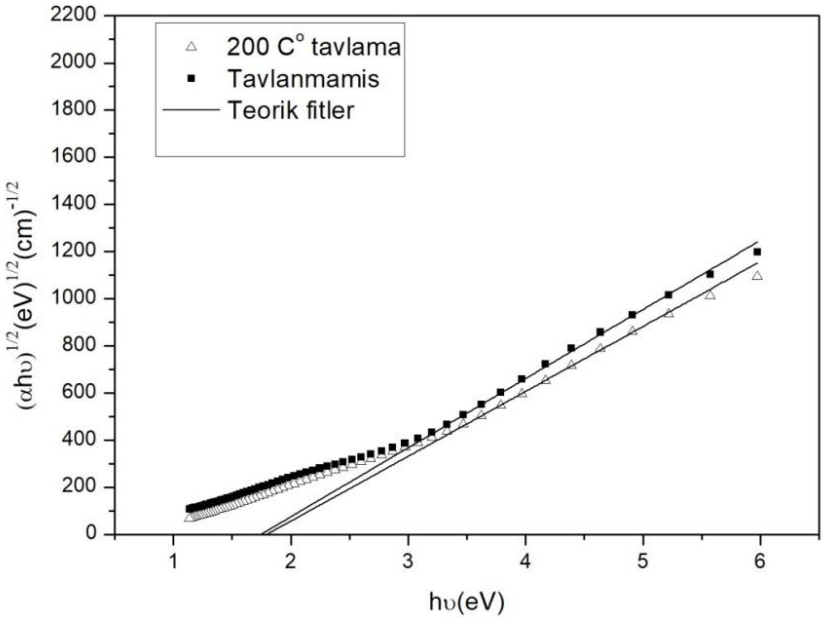
$TlGaS_2$ ince filminin tavlama öncesi ve sonrası doğrusal soğurma spektrumu şekil 4.14' de gösterilmektedir.



Şekil 4.14 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı doğrusal soğurma spektrumu

4.2.2 Tavlanmış $TlGaS_2$ ince filminin yasak enerji bant aralığı

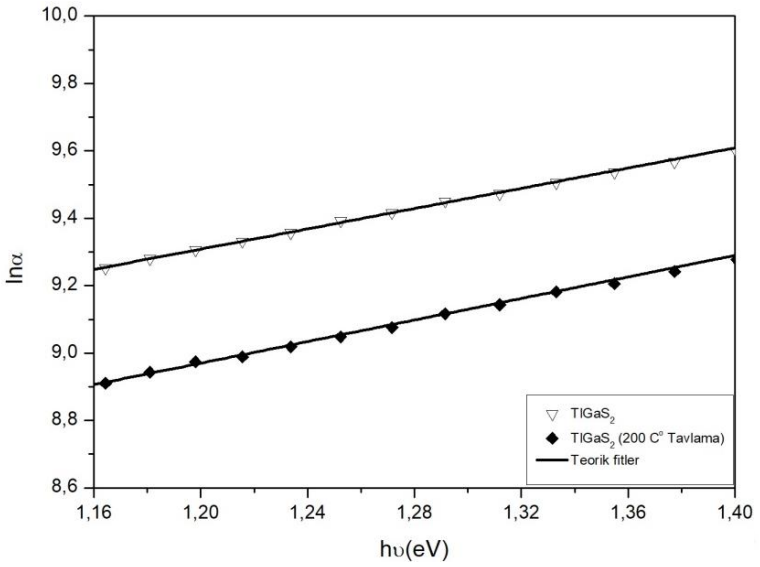
Tavlanmış örneğin doğrusal soğurma spektrumundan alınan veriler ile yasak enerji bant aralığı hesaplandı. n = 2 (m =1/2) alınarak soğurma spektrumu verileri arıtıldı ve tavlanmış örneğin bant aralığı 1.80 eV bulundu. Bant aralığı şekil 4.15' de gösterilmektedir.



Şekil 4.15 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı bant aralığı

4.2.3 Tavlanmış $TlGaS_2$ amorf ince filminin Urbach enerjisi

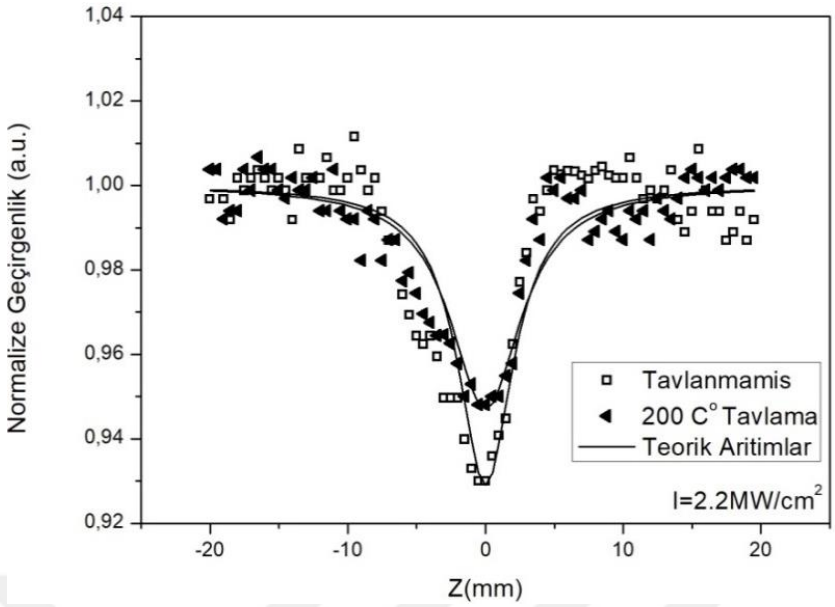
Şekil 4.16' da $TlGaS_2$ örneğinin tavlama öncesi ve tavlama sonrası $ln\alpha - hv$ grafiği gösterilmektedir. Tavlamadan önce 0.66 eV bulunan örneğin Urbach enerjisi tavlamadan sonra 0.63 eV olarak bulunmuştur.



Şekil 4.16 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı lnα' ya karşılık hv grafiği

4.2.4 Tavlanmış $TlGaS_2$ ince filminin doğrusal olmayan soğurma özellikleri

4 ns atma süresine sahip lazer ile gerçekleştirilen Z-tarama deneyleri sonucunda elde edilen ve arıtımı yapılan doğrusal olmayan soğurma verileri şekil 4.17'de grafik şeklinde verilmektedir.



Şekil 4.17 TlGaS2 ince filminin tavlanmaya bağlı açık yarık Z-tarama grafiği

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ Yarıiletken Amorf İnce Filmleri

Bu tez çalışmasında $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin değişen Ga/In oranlarına ve tavlamaya bağlı olarak doğrusal olmayan optik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelendi.

Isısal buharlaştırma sistemi ile 70 nm kalınlığında üretilen ince filmlerin doğrusal soğurma spektrumlarına şekil 4.1'de yer verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere soğurma kenarlarında keskin bir artış olmaması yasak enerji bant aralıklarında kusur seviyelerinin olduğuna işaret etmektedir. Soğurma spektrumlarının arıtımıyla hesaplanan yasak enerji bant aralıkları şekil 4.2'de verilmiş ve çizelge 5.1 de gösterilmiştir. Ga oranının artmasıyla birlikte yasak enerji bant aralıklarının 1.54 eV 'dan 1.76 eV'a kadar arttığı görülmektedir. Urbach enerjileri ise soğurma spektrumu verileriyle çizilen lnα-hv grafiklerinden elde edilmiş ve sonuçlar çizelge 5.1' de yer verilmiştir. Ga oranının artmasıyla birlikte filmlerdeki kusur seviyelerinin azaldığı görülmektedir. İnce filmlerin XRD ölçümleriyle amorf yapıda olduğu belirlenmiş ve şekil 4.8'de benzer davranış gösteren filmlerden sadece $TlGaS_2$ filminin XRD grafiği verilmiştir. Film kalınlıklarının 70 nm olduğu spektroskopik elipsometre kullanılarak yapılan analizler sonucunda doğrulanmıştır. Elipsometre sonuçları şekil 4.4-7'de gösterilmiştir. Yapılan Z-tarama deneyleri sonucunda elde edilen veriler denklem (2.7) kullanılarak arıtılmış ve sonuçlara çizelge 5.2 ve 5.3' de yer verilmiştir

Çizelge 5.1 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerin Ga/In oranına bağlı olarak E_g ve E_U değerleri

Malzeme	**Kalınlık (nm)**	E_g **(eV)**	E_U **(eV)**
$TlInS_2$	70	1.54	0.80
$TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$		1.58	0.71
$TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$		1.64	0.68
$TlGaS_2$		1.76	0.63

Urbach enerjisinin davranışı örnekteki In oranının artmasıyla yapıda atomik düzensizliklerin ve kusurların artması sonucu iletim bandı seviyesine yakın yerelleşmiş seviyelerin oluşması şeklinde yorumlanabilir. Bu seviyelerin oluşumu da bant kuyruğun genişliğini (Urbach enerjisi) artırır.

Çizelge 5.2 $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinin nanosaniye Z-tarama deneyleri ile elde edilen Ga/In oranına bağlı I_{sat} ve β_{eff} değerleri

Malzeme	***I (MW/cm²)***	***β_{eff} (cm/MW)***	***I_{sat} (MW/cm²)***	***E_g (eV)***
$TlInS_2$	2.2MW/cm^2	8.31 x 10^3	5.63 x 10^3	1.54
	4.4MW/cm^2	4.88 x 10^3		
	6.6MW/cm^2	3.45 x 10^3		
$TlGa_{0.2}In_{0.8}S_2$	2.2MW/cm^2	5.92 x 10^3	5.31 x 10^3	1.58
	4.4MW/cm^2	3.12 x 10^3		
	6.6MW/cm^2	2.05 x 10^3		
$TlGa_{0.8}In_{0.2}S_2$	2.2MW/cm^2	4.72 x 10^3	5,15 x 10^3	1.64
	4.4MW/cm^2	2.40 x 10^3		
	6.6MW/cm^2	1.73 x 10^3		
$TlGaS_2$	2.2MW/cm^2	3.46 x 10^3	5.01 x 10^3	1.76
	4.4MW/cm^2	2.04 x 10^3		
	6.6MW/cm^2	1.48 x 10^3		

Çizelge 5.2' de görüldüğü üzere Ga oranı arttırıldığı zaman β_{eff} değerleri ve I_{sat} değerleri azalmaktadır. Ga oranına bağlı gerçekleşen bu değişim literatürde yapılan diğer çalışmalarla da doğrulanmıştır (Karatay vd. 2011). $E = \hbar\omega$ ışığın enerjisi, bant aralığına ne kadar yakınlaşırsa, malzemede iki foton soğurum gerçekleştirme olasılığı bir o kadar artar. Ga oranının artmasıyla malzemenin yasak enerji band aralığında meydana gelen artma, ışığın enerjisi ile bant enerjisi arasındaki farkın artması anlamına

gelir. Bu da azalan bir iki foton soğurum olasılığı anlamına gelir ve doğrusal olmayan soğurmaya gelen katkı azalır. Dolayısıyla tüm şiddet değerlerinde $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ ($0 \leq x \leq 1$) ince filmlerinde x değerinin artmasıyla gözlemlenen doğrusal olmayan soğurma katsayıları azalma eğilimi göstermektedir. Artan Ga oranı ile kusur seviyelerinin azalması da doğrusal olmayan soğurmanın azalmasına neden olan etkenlerden bir diğeridir. Ayrıca Ga oranına bağlı olarak kusur seviyelerinin azalması doyum eşik şiddetinde de bir azalmaya neden olmuştur ve benzer etkilere literatürde yapılan diğer çalışmalarda da rastlanmıştır (Yüksek vd. 2010, Kürüm vd. 2010).

5.2. Tavlanmış $TlGaS_2$ Amorf İnce Filmi

Çizelge 5.3 $TlGaS_2$ ince filminin tavlama işlemine bağlı nanosaniye açık yarık Z-tarama deneyleri ile elde edilen I_{sat} ve β_{eff} değerleri

Malzeme	**Tavlama Durumu**	β_{eff} **(cm/MW)**	I_{sat} **(MW/cm^2)**	E_g **(eV)**
$TlGaS_2$	Tavlanmamış	3.46×10^3	5.01×10^3	1.76
	373 K'de tavlanmış	3.46×10^3	5.01×10^3	1.76
	473K'de tavlanmış	2.97×10^3	4.87×10^3	1.80

Tavlanan $TlGaS_2$ ince filmlerinin Z-tarama deneyleri ile elde edilen I_{sat} ve β_{eff} değerleri çizelge 5.3'te verilmiştir. 373 K'de yapılan tavlama işlemi sonucunda malzemenin özelliklerinde herhangi bir değişiklik gerçekleşmemiştir. Bununla beraber 473 K'de yapılan tavlama işlemi sonucu çizelge 5.4'ten de görüldüğü üzere Urbach enerjisindeki azalma kusur seviyelerinin azaldığını göstermektedir. Tavlama ile birlikte kusur seviyelerinin azalması sonucu β_{eff} ve I_{sat} değerlerinin de azaldığı çizelge 5.3'te görülmektedir.

Sonuç olarak, Ga/In oranı değiştirilerek ve tavlama işlemi uygulanarak kusur seviyelerinin yoğunluğu ve bant aralığı kontrol edilebilmekte, bunun sonucunda da optik uygulamalarında büyük öneme sahip olan doyum eşik şiddeti değerinin ve doğrusal olmayan soğurma katsayısının kontrol edilebilmesi sağlanabilmektedir.

Literatürde $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0 \leq x \leq 1)$ ince filmlerin doğrusal olmayan optik özellikleri üzerine yapılmış çalışmalar bulunmamakla birlikte, benzer koşullar altında üretilmiş ve deneyleri yapılmış (yaklaşık olarak aynı kalınlıkta üretilmiş ve aynı şiddet değerlerinde z-tarama düzeneği ile incelenmiş) örneklerin sonuçları göz önüne alınarak I_{sat} ve β_{eff} değerleri kıyaslanabilir. Teknolojik uygulamalarda malzemelerin pasif q-anahtarlama (passive q-switching) yöntemi için doyurulabilir soğurucu olarak kullanımı açısından I_{sat} değerlerinin küçük olması ve optik sınırlama yöntemi için β_{eff} değerlerinin büyük olması aranmaktadır.

Literatürde yapılan çalışmalarda InSe ve GaSe ince filmlerinin β_{eff} ve I_{sat} değerleri sırasıyla 1.6×10^2 - 3.1×10^2 cm/MW aralığında ve 10^2 - 10^5 MW/cm^2 aralığında bulunmuştur (Yüksek vd. 2010, Kürüm vd. 2010). Bu değerler ile karşılaştırıldığında $TlGa_xIn_{(1-x)}S_2$ $(0 \leq x \leq 1)$ ince filmlerinin I_{sat} değerleri $4.87 \times 10^3 - 5.63 \times 10^3$ MW/cm^2 aralığında ve β_{eff} değerleri 1.48×10^3 - 8.31×10^3 MW/cm^2 aralığında çıkmıştır. Yüksek çıkan β_{eff} değerleri ve düşük çıkan I_{sat} değerleri örnekleri pasif q-anahtarlama gibi teknolojik uygulamalar için potansiyal aday haline getirmektedir.

Çizelge 5.4 $TlGaS_2$ ince filminin tavlama işlemine bağlı olarak E_g ve E_U değerleri

Malzeme	**Tavlama Durumu**	**Kalınlık (nm)**	E_g **(eV)**	E_U **(eV)**
$TlGaS_2$	Tavlanmamış	70nm	1.76	0.63
	373 K'de tavlanmış		1.76	0.63
	473K'de tavlanmış		1.80	0.58

KAYNAKLAR

Adduci, F., Catalano, I. M., Cingolani, A. and Minafra, A. 1977. Direct and İndirect Two Photon Process in Layered Semiconductors. Phy. Rev. B. Vol. 15, 2p.

Bass, M., Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W. and Weinreich, G. 1962. Optical Mixing. Phys. Rev. Lett. Vol. 8, pp.18-18.

Bass, M., Franken, P. A., Ward, J. F. and Weinreich, G. 1962. Optical Rectification. Phys. Rev. Lett. Vol. 9, pp.446-448.

Fan, Y. X., He, J. L., Wang, Y.G., Liu, S., Wang, H. T. and Ma, X. Y. 2005. 2-ps passively mode-locked Nd:YVO4 Laser Using an Output-Coupling-Type Semiconductor Saturable Absorber Mirror . Appl. Phys. Lett. Vol. 86, 101103p.

Franken, P. A., Hill, A. E., Peters, C. W. and Weinreich, G. 1961. Generation of Optical Harmonics. Phys. Rev. Lett. Vol. 7, pp.118-119

Giordmaine, J. A. and Miller, R. C. 1965. Tunable Coherent Parametric Oscillation in LiNbO3 at Optical frequencies. Phys. Rev. Lett. Vol. 14, pp.973-976.

He, J. L., Fan, Y. X., Du, J., Wang, Y. G., Liu, S., Wang, H. T., Zang, L. H. and Hng, Y. 2004. 4-ps passively mode-locked Nd:Gd0.5Y0.5VO4 Laser With a Semiconductor Saturable-Absorber Mirror. Opt. Lett. Vol. 29, 2803p.

Kürüm, U., Yüksek, M., Yaglioglu, H.G., Elmali, A., Ateş, A., Karabulut, M. and Mamedov, G. M. 2010. The Effect Of Thickness And/Or Doping On The Nonlinear and Saturable Absorption Behaviors İn Amourphous Gase Thin Films. Journal of Appl. Phys. Vol. 108, 063102p.

Maciel, G. S., Rakov, N., De Araujo, C. B., Lipovskii, A. A. and Tagantsev, D. K. 2001. Optical Limiting Behavior of a Glass–Ceramic Containing Sodium Niobate Crystallites . Appl. Phys. Lett. Vol. 79, 584p.

Neihuhr, K. E. 1963. Generation of Laser Axial Mode Difference Frequencies in a Nonlinear Dielectric. Appl. Phys. Lett. Vol. 2, pp.136-137.

Pramodini, S (2015) Third-order optical Nonlinearity and Optical Power Limiting of Organic Materials Under CW Laser Illumination. Phd. Thesis thesis, Manipal Institute of Technology, Manipal.

Smith, A. W. and Braslou, N. 1963. Observation of an Optical Difference Frequency. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp.2105-2106.

Sutherland, R.L., McLean, D.G. and Kirkpatrick S. 2003. Handbook of Nonlinear Optics. New York Basel.

Terhune, R. W., Maker, P. D. and Savage, C. M. 1962. Optical harmonic Generation in Calcite. Phys. Rev. Lett. Vol. 8, pp.404-406.

Vodopyanov, K. L., Mirov, S. B., Veovodin, V. G. and Schunemann, P. G. 1998. Two photon absorption in GaSe and CdGeAs2. Optics Commun. Vol. 155, pp.47-50

Wang, C. C. and Racette, G. W. 1965. Measurement of Parametric Gain Accompanying Optical Difference Frequency Generation. Appl. Phys. Lett. Vol. 6, pp.169-171.

Yüksek, M., Elmali, A., Karabulut, M. and Mamedov, G. M. 2010. Nonlinear Absorption in Undoped and Ge Doped Layered GaSe Semiconductor Crystals. Appl. Phys. B. Vol. 98, pp.77-81

Yüksek, M., Kürüm, U., Yaglıoglu, H. G., Elmali, A. and Ateş, A. 2010. Nonlinear and Saturable Absorption Characteristics of Amorphous InSe Thin Films. Journal of Appl. Phys. Vol. 107, 033115p.

Zakery, A. ve Elliott, S.R., 2007, Optical Nonlinearities in Chalcogenide Glasses and Their Applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 199 s.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Bekir Asilcan ÜNLÜ
Doğum Yeri	: Ankara
Doğum Tarihi	: 01.07.1990
Medeni Hali	: Bekar
Yabancı Dili	: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	: TED Ankara Koleji (2008)
Lisans	: Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2016)
Yüksek Lisans	: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2019)

Çalıştığı Kurum :

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü

(Araştırma Görevlisi, 2017-)