

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HOLMİYUM KATKILI İNDİYUM SELEN TEK KRİSTALİNİN ve AMORF  
YAPIDAKİ İNCE FİLMLERİNİN ÇİZGİSEL OLMAYAN SOĞURMA  
ÖZELLİKLERİ**

**Erbil Murat AYDIN**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ANKARA  
2011**

**Her hakkı saklıdır**

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## HOLMİYUM KATKILI İNDİYUM SELEN TEK KRİSTALİNİN ve AMORF YAPIDAKİ İNCE FİLMLERİNİN ÇİZGİSEL OLMAYAN SOĞURMA ÖZELLİKLERİ

Erbil Murat AYDIN

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU

Bu tez çalışmasında, tabakalı III-VI yarıiletken ailesinden farklı oranlarda holmiyum katkılarıyla katkılandırılmış İndiyum Selen (InSe:Ho) kristallerinin çizgisel olmayan soğurma özellikleri açık yarık z-tarama deney yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Açık yarık z-tarama deneyi 4 ns ve 65 ps atma süresine sahip iki lazer kaynağı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra 48 nm, 58 nm, 70 nm ve 80 nm kalınlıklarında indiyum selen amorf yarıiletken ince filmleri ve 48 nm ve 58 nm kalınlıklarında farklı katkı oranlarında holmiyum katkılandırılmış indiyum selen amorf yarıiletken ince filmleri vakum altında ısısal buharlaştırma yöntemi kullanılarak büyütülmüştür. Büyütülen bu ince filmlerin çizgisel olmayan soğurma özellikleri 65 ps atma süreli lazer kaynağıyla incelenmiştir. Ayrıca çizgisel olmayan soğurma davranışının bağlı olduğu, elektronların uyarılmış durumda kalma süreleri ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopisi (pump-probe) yöntemiyle belirlenmiştir.

65 ps atmalı lazer sistemiyle incelenen 194 µm ve 70 µm kalınlıklarındaki InSe:Ho kristalleri düşük şiddetlerde doyurulabilir soğurma özelliği gösterirken daha yüksek şiddetlerde çizgisel olmayan soğurma özelliği göstermektedirler. Amorf yapıdaki InSe filmlerinden ince olanlar (48 nm ve 58nm) doyurulabilir soğurma özelliği gösterirken, daha kalın (70nm ve 80nm) olanlar ise çizgisel olmayan soğurma özelliği göstermektedirler. 48 nm kalınlığındaki InSe:Ho filmleri bütün katkı oranlarında doyurulabilir soğurma özelliği göstermektedir. 58 nm kalınlığındaki InSe filmi doyurulabilir soğurma özelliği gösterirken, aynı kalınlıktaki InSe:Ho filmleri bütün katkı oranlarında çizgisel olmayan soğurma özelliği göstermektedir. Gözlenen çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma davranışları yasak enerji aralığındaki lokalize kusur seviyelerinin yoğunluğu ile açıklanmıştır.

**Haziran 2011, 58 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** InSe, InSe:Ho yarıiletken kristalleri, yarıiletken amorf ince film, çizgisel olmayan soğurma, doyurulabilir soğurma, z-tarama deneyi

# ABSTRACT

Master Thesis

NONLINEAR ABSORPTION PROPERTIES of HOLMIUM DOPED INDIUM SELENIDE SINGLE CRYSTAL and ITS AMORPHOUS THIN FILMS

Erbil Murat AYDIN

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

Supervisor: Assoc.Prof.Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU

Nonlinear optical properties of holmium doped indium selenide crystals with different holmium doping ratio were investigated. Open aperture z-scan experiments were performed by using two different laser sources with 4 ns and 65 ps pulse durations. Amorphous InSe thin films with 48nm, 58nm, 70nm, 80 nm thicknesses and amorphous InSe: Ho thin films at different holmium concentrations with 48 nm and 58 nm thicknesses were deposited by using thermal evaporation method. Nonlinear absorption properties of these films have been investigated and compared by using laser source with 65 ps pulse duration. Besides, the lifetime of excited electrons effecting nonlinear absorption behavior was determined by using ultrafast spectroscopy ( pump-probe ) technique.

InSe:Ho crystals, which have been investigated by using laser source with 65 ps pulse duration showed saturable absorption at low input intensities. However, nonlinear absorption became dominant at higher input intensities. When thinner (48nm and 58 nm ) InSe thin films showed saturable absorption, thicker ( 70 nm and 80 nm ) InSe thin film showed nonlinear absorption due to increased number of localized defect states with increasing film thickness in the band gap. 48 nm InSe:Ho thin films doped with different holmium concentration showed saturable absorption. However, 58 nm InSe:Ho thin films showed nonlinear absorption. While 58 nm InSe thin film showed saturable absorption, 58 nm InSe:Ho thin films showed nonlinear absorption due to increased doping states in the band gap with the effect of doping.

**June 2011, 58 pages**

**Key Words:** InSe, InSe:Ho semiconductor single crystals, semiconductor amorphous thin film, nonlinear absorption, saturable absorption, z-scan experiment

## TEŐEKKÖRLER

Çalıőmalarımnda beni destekleyen, yardımlarını hiç esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) başta olmak üzere fikirleriyle bu çalıőmama önemli katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Ayhan ELMALI'ya (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve sağladığı diğer katkılar yanında bu tezde çalışılan kristalleri büyüten Sayın Prof. Dr. Aytunç ATEŞ'e (Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı) ve optik malzemeler araştırma grubumuzdaki bütün arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Erbil Murat AYDIN

Ankara, Haziran 2011

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜRLER .....	iii
SİMGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Yarıiletkenler .....	4
2.2 Çizgisel ve Çizgisel Olmayan Soğurma .....	6
2.2.1 Çizgisel soğurma .....	6
2.2.2 Çizgisel olmayan soğurma .....	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	14
3.1 Dikey Bridgman-Stockbarger Yöntemi .....	15
3.2 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma Yöntemi .....	17
3.2.1 InSe ve InSe:Ho ince filmlerinin büyütülmesi.....	18
3.3 Yarıiletkenlerde Çizgisel Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji..... Aralığının Belirlenmesi.....	19
3.4 Malzemelerin Kalınlıklarının Belirlenmesi .....	20
3.5 Çizgisel Olmayan Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi .....	22
3.5.1 Z-tarama tekniği .....	22
3.6 Ultra Hızlı Pompa-Gözlem Spektroskopi Tekniği .....	26
4. BULGULAR .....	28
4.1 Kristallerin Ölçüm Sonuçları.....	28
4.1.1 Kristallerin kalınlıkları.....	28
4.1.2 Kristallerin çizgisel soğurma spektrumları .....	29
4.1.3 Kristallerin yasak enerji aralıkları.....	30
4.1.4 Kristallerin çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma özellikleri .....	30
4.2 Amorf İnce Filmlerin Ölçüm Sonuçları .....	32
4.2.1 Amorf ince filmin XRD sonucu.....	32

4.2.2	Amorf ince filmlerin kalınlıkları.....	32
4.2.3	Amorf ince filmlerin çizgisel soğurma spektrumları .....	35
4.2.4	Amorf ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları.....	36
4.2.5	Amorf ince filmlerin çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma özellikleri .....	38
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ.....	40
5.1	Kristaller .....	40
5.2	Amorf İnce Filmler .....	44
5.2.1	InSe amorf ince filmleri .....	47
5.2.2	InSe:Ho amorf ince filmleri .....	50
	KAYNAKLAR .....	54
	ÖZGEÇMİŞ.....	58

## SİMGELER DİZİNİ

RSA	Ardışık foton soğurması
$\tau$	Atma süresi
$\beta_{\text{eff}}$	Çizgisel olmayan soğurma katsayısı
$\alpha_0$	Çizgisel soğurma katsayısı
SA	Doyurulabilir soğurma
$\tau_c$	Elektron-deşik birleşme süresi
T	Geçirgenlik
$z_0$	Işının kırınım uzunluğu
$\omega_0$	Işının odaktaki yarıçapı
TPA	İki foton soğurması
$\beta$	İki foton soğurma katsayısı
$F_S$	Malzemenin doyum akısı
$I_S$	Malzemenin doyuma ulaşma eşik şiddeti
ns	Nanosaniye
$I_0$	Odaktaki şiddet
ps	Pikosaniye
$\sigma_c$	Serbest taşıyıcı ara kesiti
$\sigma$	Soğurma tesir kesiti
$\chi^{(3)}$	Üçüncü dereceden çizgisel olmayan alınganlık
$E_g$	Yasak enerji bant aralığı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Yarıiletkenlerde değerlik ve iletim bandı.....	4
Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde direk ve indirek bant geçişleri.....	5
Şekil 2.3 Katkılı yarıiletkenlerin enerji seviyeleri (Sari 2008) .....	6
Şekil 2.4 Işığın çizgisel soğurulması.....	7
Şekil 2.5 İki foton soğurması .....	9
Şekil 3.1 InSe kristalinin yapısı .....	14
Şekil 3.2 Bridgman fırınının şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.3 InSe:Ho kristalinin bir kesiti (foto, 2011).....	16
Şekil 3.4 Vakum altında ısısız buharlaştırma sistemi (foto, 2011) .....	17
Şekil 3.5 Fused silika üzerine büyütülmüş InSe: Ho ince filmi (foto, 2011).....	18
Şekil 3.6 Çizgisel soğurma spektrometresi (foto, 2011).....	20
Şekil 3.7 Spektroskopik elipsometrenin şematik gösterimi .....	21
Şekil 3.8 Spektroskopik elipsometre (foto, 2011).....	22
Şekil 3.9 Çizgisel olmayan soğurma grafiği .....	24
Şekil 3.10 Doyurulabilir soğurma grafiği .....	24
Şekil 3.11 Açık yarık z-tarama deney düzeneği (foto, 2011) .....	25
Şekil 3.12 Ultra hızlı spektroskopi deney düzeneği (foto, 2011).....	27
Şekil 4.1 %0,005 Ho katkılı InSe:Ho kristalinin SEM görüntüsü .....	28
Şekil 4.2 %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristalinin SEM görüntüsü .....	29
Şekil 4.3.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho .....	
kristallerinin çizgisel soğurma spektrumları .....	29
Şekil 4.4 InSe:Ho kristalinin yasak enerji bant aralığının hesaplanması .....	30

Şekil 4.5.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin nanosaniyeaçık yarık z-tarama grafikleri.....	31
Şekil 4.6.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin nanosaniye açık yarık z-tarama grafikleri.....	31
Şekil 4.7 58 nm kalınlığındaki %0,1 Ho katkılı InSe:Ho amorf ince filminin XRD verisi.....	32
Şekil 4.8 58 nm kalınlığındaki InSe ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri.....	33
Şekil 4.9 58 nm kalınlığındaki %0,005 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri .....	33
Şekil 4.10 58 nm kalınlığındaki %0,01 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri .....	34
Şekil 4.11 58 nm kalınlığındaki %0,05 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri .....	34
Şekil 4.12 58 nm kalınlığındaki %0,1 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri .....	35
Şekil 4.13 InSe ince filmlerinin soğurma spektrumu.....	35
Şekil 4.14 %0.005 Ho katkılı InSe:Ho ince filmlerinin soğurma spektrumu .....	36
Şekil 4.15 InSe ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları .....	37
Şekil 4.16 InSe:Ho ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları.....	37
Şekil 4.17 Farklı kalınlıklarda InSe ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği .....	38
Şekil 4.18 Farklı katkı oranlarındaki 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği.....	39

Şekil 4.19 Farklı katkı oranlarındaki 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği .....	39
Şekil 5.1.a. %0,005 Ho katkı, b. %0,05 Ho katkı InSe:Ho kristallerinin nanosaniye açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı .....	42
Şekil 5.2.a. %0,005 Ho katkı, b. %0,05 Ho katkı InSe:Ho kristallerinin pikosaniye açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı .....	43
Şekil 5.3 InSe:Ho ince filminin ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopisi .....	47
Şekil 5.4 Farklı kalınlıklarda InSe ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama Deney verilerinin arıtımı .....	49
Şekil 5.5 Farklı katkı oranlarındaki 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı .....	51
Şekil 5.6 Farklı katkı oranlarındaki 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı .....	52

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 4 ns arıtım sonuçları.....	43
Çizelge 5.2 65 ps arıtım sonuçları.....	44
Çizelge 5.3 InSe amorf ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları.....	49
Çizelge 5.4 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları .....	52
Çizelge 5.5 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları .....	53

## 1. GİRİŞ

Optik, ışığın davranışını ve madde ile etkileşmesini inceleyen bir bilim dalıdır. Optiğin en önemli dallarından birisi de çizgisel olmayan optiktir. Çizgisel olmayan optik, yüksek şiddetli ışık ile malzemenin soğurma, kırılma, yansıma gibi optik özelliklerinin değiştirilmesi olaylarını inceleyen bilim dalıdır. Yüksek şiddetli ışık yalnızca lazer kaynakları kullanılarak elde edilebilir. Çizgisel olmayan optik, 1960' da Maiman tarafından ilk lazerin yapılmasından kısa bir süre sonra Franken ve arkadaşları tarafından ikinci harmonik üretiminin keşfiyle başlar (Franken vd. 1961). Bu çalışmaları, toplam frekans üretimi (Bass vd. 1962), fark frekans üretimi ( Neihuhr 1963, Smith vd. 1963), optik düzleme (Bass vd. 1962) gibi birçok çalışma takip etmiştir. Çizgisel olmayan optiğin, optik bilgi depolama, optik anahtarlama, optik haberleşme, optik sırlayıcılar gibi birçok kullanım alanı vardır.

Yarıiletkenler dedektör, transistör, diyot gibi aygıtların yapımında kullanılan malzeme gruplarından. Yarıiletkenler büyük çizgisel olmayan alınganlıklara sahip olmaları ve tepki sürelerinin kısa olması nedeniyle çizgisel olmayan aygıt yapımı için çok uygun malzemelerdir. Yarıiletkenlerin çizgisel olmayan soğurma ve doyurulabilir soğurma özellikleri, optik sınırlama, optik haberleşme, Q-anahtarlama, foton enerjisini arttırma, yarıiletken doyurulabilir soğurma gösteren aynalar (SESAM) ve mod-kilitleme gibi birçok teknolojik alanda kullanıldığı için bu malzemeler üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Yarıiletkenlerin, çizgisel olmayan veya doyurulabilir soğurma göstermeleri kullanılan lazer ışığının atma enerjisine ve yarıiletkenin yasak enerji aralığına bağlıdır. Kullanılan lazer ışığının atma enerjisi, yarıiletkenin yasak enerji aralığının yarısından büyük ve tamamından küçükse ( $E_g > \hbar\omega > \frac{E_g}{2}$ ) çizgisel olmayan soğurma (iki foton soğurması) gözlenir. Bu durum yarıiletkenin yasak enerji aralığında katkı ve kusur seviyeleri olmaması halinde geçerlidir. Yarıiletkenin yasak enerji aralığında, katkı veya kusur seviyeleri varsa lazer ışığının şiddeti iki foton soğurmasını meydana getirecek kadar yüksek değilse çizgisel olmayan soğurma veya doyurulabilir soğurma gözlenebilir. Bu

durum kusur seviyesinin ömrü lazer atma süresinden uzun ise gözlenebilir. Kullanılan lazer ışığının enerjisinin yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük olduğu durumda da doyurulabilir soğurma gözlenebilir.

İndiyum selen kristali külçe halinde çizgisel olmayan optik alanında ilke kez Catalano vd. (1979) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada InSe kristalinin ikinci harmonik üretimi verimliliği incelenmiştir. InSe külçe kristalinin çizgisel olmayan soğurma davranışı Segura vd. (1997) tarafından incelenmiştir. Gürbulak vd. (1998) tarafından saf InSe ve Ho katkılı InSe kristallerinin sıcaklığa ve katkılamaya bağlı çizgisel soğurma özellikleri incelenmiş ve çizgisel soğurma katsayıları, eksiton enerji seviyeleri belirlenmiştir. Saf InSe ve Gd katkılı InSe kristalinin sıcaklığa bağlı çizgisel soğurma özellikleri incelenmiş ve çizgisel soğurma katsayıları belirlenmiştir. (Gürbulak 2004). Farklı Ho oranlarında katkılandırılmış InSe:Ho kristalinin elektriksel ve elektrik alan altında çizgisel soğurma özellikleri incelenmiştir (Ateş 2004). Katerynchuk vd. (2006) tabakalı indiyum selen kristalinin fotoluminesans özelliklerini inceleyerek enerji seviyelerini belirlemişlerdir (Katerynchuk vd. 2006). Er katkılı ve saf InSe çizgisel soğurma özelliklerinin elektrik alan ve sıcaklığa bağlılığı Kundakçı vd. (2008) tarafından incelenmiştir.

Farklı kalınlıklarda vakum altında ısısız buharlaştırma yöntemiyle büyütülen InSe amorf filmlerinin çizgisel olmayan soğurma özellikleri daha önce incelenmiştir (Yüksek vd. 2010). İnce filmler (20nm ve 52 nm) kalınlığındaki filmler doyurulabilir soğurma özelliği gösterirken, daha kalın filmlerde (70nm ve 104 nm) çizgisel olmayan soğurma özelliği gözlenmektedir. Bu da kalınlığın artması nedeniyle bant aralığındaki kusur seviyelerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde ilk defa çok ince filmlerde doyurulabilir soğurma gözlenmiş ve kalınlığın kontrolü ile doğrusal olmayan soğurmaya geçilmiştir.

Kürüm vd. (2010) tarafından 38 ile 74 nm aralığında farklı kalınlıklarda GaSe, GaSe:Ge, GaSe:Sn amorf yapıdaki ince filmlerinin çizgisel olmayan soğurma özellikleri nanosaniye ve pikosaniye atmalı lazerlerle incelenmiştir. Burada Ge ve Sn katkılandırmalarının çizgisel olmayan soğurma üzerine etkisi araştırılmış ve ultra-hızlı

pompa-gözlem spektroskopisi yöntemiyle doğrusal olmayan soğurma mekanizmaları araştırılmıştır.

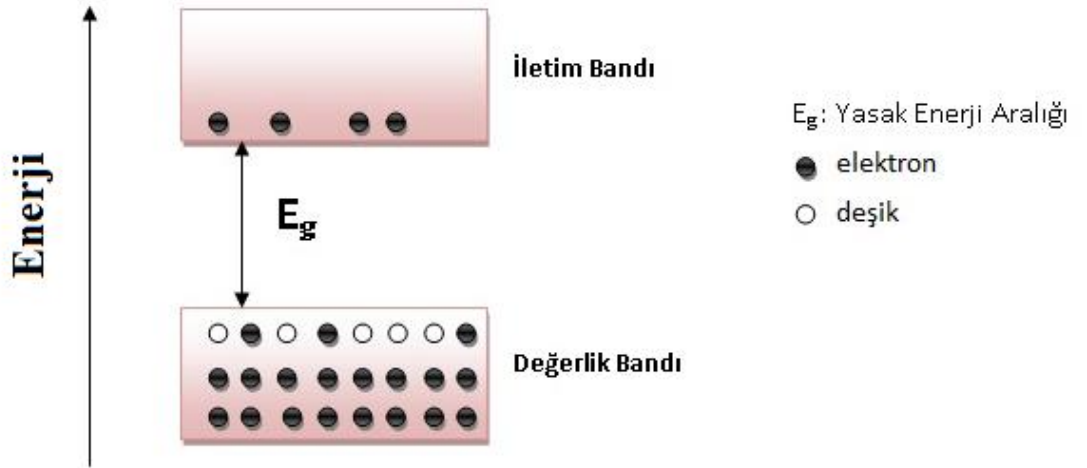
Yüksek vd. (2009) tarafından Sn katkılı GaSe kristalinde katkılandırmanın çizgisel olmayan soğurma üzerine etkisi incelenmiştir. Saf GaSe ve Ge katkılı GaSe kristallerinin çizgisel olmayan soğurma özellikleri incelenmiştir (Yüksek vd. 2010).

Yarıiletken malzemelerin optik özelliklerini değiştirmek için malzemeler katkılandırılabilir. Bu tez çalışmasında da InSe yarıiletkenine farklı katkı oranlarında Ho katkılandırılarak malzemenin çizgisel olmayan soğurma özellikleri üzerine katkılandırma etkisi incelenmiştir. Vakum altında ısıl buharlaştırma yöntemiyle büyütülen indiyum selen (InSe) amorf ince filmlerinin ve %0,005, %0,01, %0,05, %0,1 holmiyum katkılandırılmış indiyum selen (InSe:Ho) kristallerin ve yine vakum altında ısıl buharlaştırma yöntemiyle büyütülmüş InSe:Ho amorf ince filmlerinin çizgisel olmayan soğurma özellikleri z-tarama deneyi yöntemiyle incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Yarıiletkenler

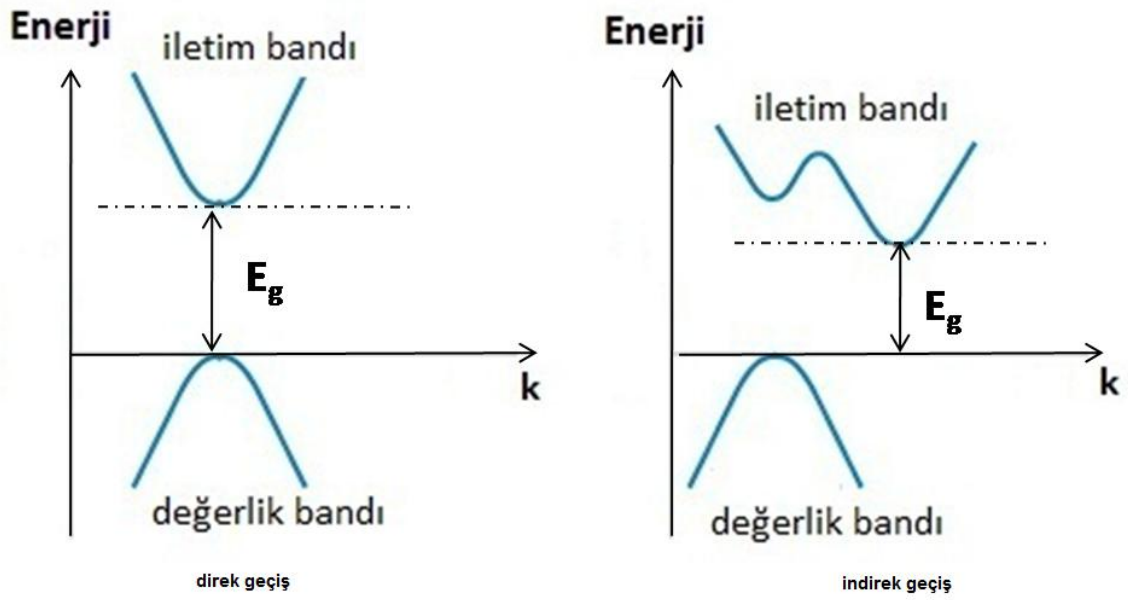
Yarıiletkenler, elektrik iletkenliği bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında kalan maddelerdir. Normal durumda yalıtkan olan bu maddeler, ısı, ışık, manyetik ya da elektriksel gerilim gibi dış etkiler uygulandığında bir miktar değerlik elektronları serbest hale geçmesiyle iletkenlik özelliği kazanırlar. Yarıiletkenlerin en önemli özellikleri serbest taşıyıcılarının kolayca hareket edebilecekleri bantlara sahip olmalarıdır. Bu bantlara değerlik bandı ve iletkenlik bandı adları verilir. Kusursuz, saf kristallerde değerlik ve iletim bandı arasında kalan enerjilerde elektronların yerleşeceği seviyeler yoktur. Bu bölgeye yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) denir. Kristalde yapı kusurları veya katkı atomları varsa yasak enerji aralığında safsızlık veya kusur seviyeleri oluşur. Kristaldeki serbest taşıyıcılar elektronlar ve deşiklerdir. Deşik, elektronların değerlik bandından iletkenlik bandı veya kusur seviyelerine taşınması sonucu değerlik bandında meydana gelen boşluğa denir. Şekil 2.1'de kusursuz ve katkısız bir yarıiletken kristalin bant yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yarıiletkente değerlik ve iletim bandı

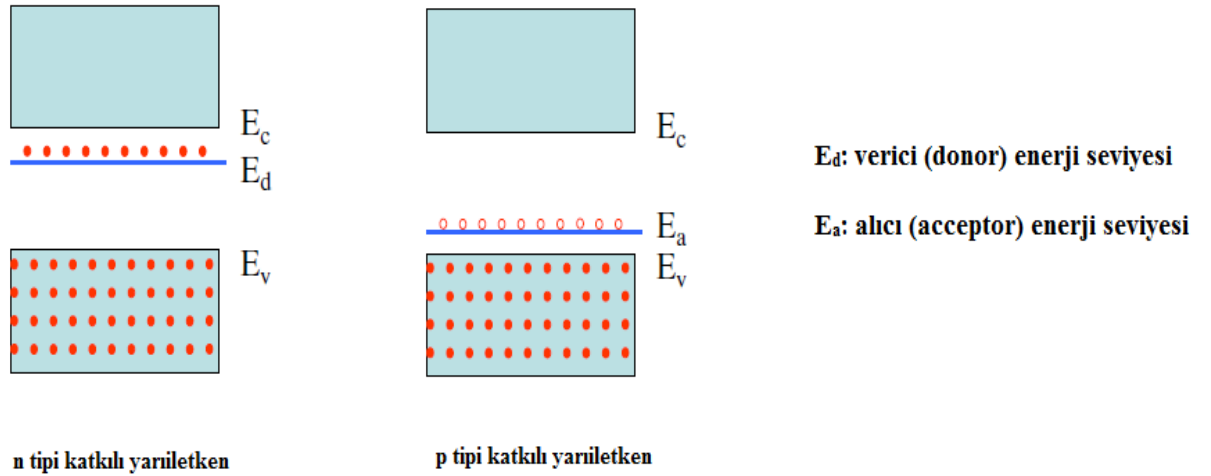
Yarıiletkenler direk bant aralığına veya indirek bant aralığına sahiptirler. İletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu aynı dalga vektörü üzerinde yer

alıyorsa, yarıiletken direk bant aralığına sahiptir. İletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu farklı dalga vektörü üzerinde yer alıyorsa, yarıiletken indirek bant aralığına sahiptir. Direk ve indirek bant yapıları şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde direk ve indirek bant geçişleri

Yarıiletkenler buldukları atomlara göre saf ve katkılı yarıiletkenler olarak ikiye ayrılabilirler. Katkılandırılan atom kristalde elektron fazlalığı yaratıyorsa bu tür yarı iletkenlere n-tipi katkılı yarıiletkenler denir. Kristale elektron verdiği için bu tür atomlara verici (donor) atomlar denir. Katkılandırılan atom kristalden elektron alıyorsa bu tür yarı iletkenlere p-tipi katkılı yarıiletkenler denir. Kristalden elektron aldığı için bu tür atomlara alıcı (acceptor) atomlar denir. Şekil 2.3’te katkılı yarıiletken kristallerin enerji bant yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Katkılı yarıiletkenlerin enerji seviyeleri (Sari 2008)

## 2.2 Çizgisel ve Çizgisel Olmayan Soğurma

### 2.2.1 Çizgisel soğurma

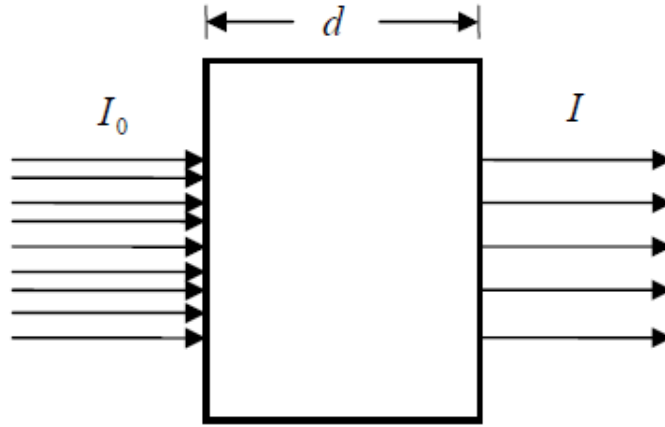
Kalınlığı  $d$  olan saydam bir ortam üzerine taban seviyesindeki (yarıiletkenlerde değerlik bandı) elektronları birinci uyarılmış seviyeye (yarıiletkenlerde iletim bandı) çıkartabilecek kadar enerjiye sahip bir ışık demeti gönderildiğinde malzeme gelen ışığın bir kısmını soğurur. Bu olaya çizgisel soğurma denir. Buradaki etkileşme foton-elektron etkileşmesidir. Şekil 2.4’te gösterildiği gibi malzeme gelen ışığın bir kısmını soğurduğu için malzemeden çıkan ışığın şiddeti malzemeye gelen ışığın şiddetinden daha küçüktür. Çizgisel soğurma Beer Lambert Yasası ile açıklanır.

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.1)$$

Burada  $I_0$  malzemeye gelen ışığın şiddeti,  $I$  malzemeden çıkan ışığın şiddeti,  $\alpha$  çizgisel soğurma katsayısı ve  $d$  malzemenin kalınlığıdır. Çizgisel soğurma katsayısı

malzemelerin çizgisel olmayan soğurma özelliklerinin belirlenmesi için gerekli olan parametrelerden birisidir.

Buradaki soğurma işleminde taban seviyesindeki elektronlar birinci uyarılmış seviyeye tek foton yardımıyla çıkarılırlar. Malzemeye gönderilen ışığın şiddeti malzemede çizgisel olmayan optik tepkiler gerçekleştiremeyecek kadar küçük ise çizgisel soğurma olayı meydana gelir, aksi taktirde çizgisel olmayan soğurmayı da dikkate almak gerekir. Saf yarıiletken kristallerde çizgisel soğurma gelen fotonun enerjisini değerlik bandındaki bir elektrona aktararak onu iletkenlik bandına taşıması ile oluşur. Yarıiletkende safsızlıklar varsa safsızlıklardan oluşan kusur seviyelerine de tek foton soğurması olabilir.



Şekil 2.4 Işığın çizgisel soğurulması

### 2.2.2 Çizgisel olmayan soğurma

Yüksek şiddetli bir ışık malzeme üzerine gönderildiğinde malzemenin optik özelliklerinde değişiklikler meydana gelebilir. Malzemede optik özelliklerin değişimine neden olacak şiddetteki ışın lazerler kullanılarak elde edilebilir. Yüksek şiddetli lazer ışınının neden olduğu optik değişikliklerden birisi de malzemenin şiddete bağlı soğurma özelliğidir. Çizgisel olmayan soğurma şiddet ya da akının bir fonksiyonu olarak malzemenin geçirgenliğindeki değişiklik olarak nitelendirilir. Artan şiddete bağlı olarak

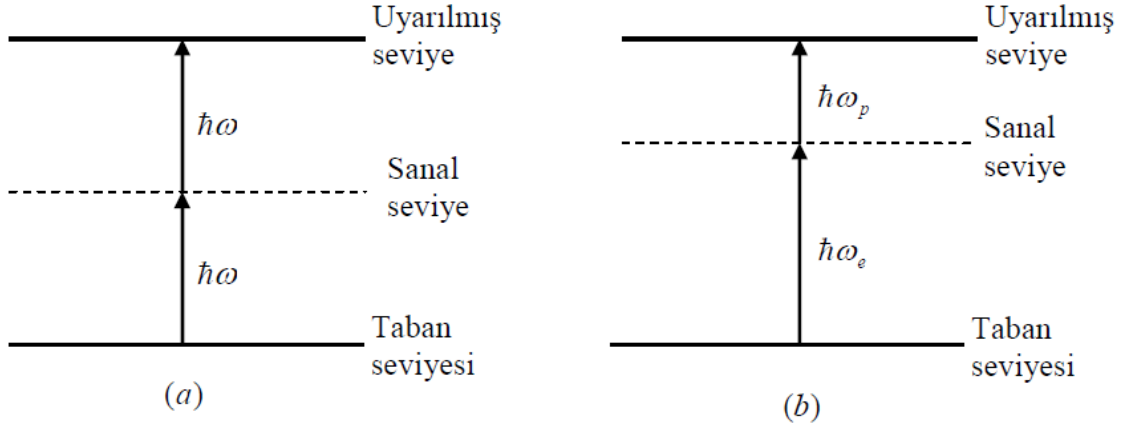
geçirgenlik artıyorsa doyurulabilir soğurma, geçirgenlik azalıyorsa iki veya daha fazla foton soğurması, ardışık foton soğurması, serbest taşıyıcı soğurması ve uyarılmış durum soğurması olarak adlandırılır.

Malzemelerin çizgisel olmayan soğurma özelliklerinin optik haberleşme, optik sınırlama, optik anahtarlama, optik veri depolama gibi önemli uygulama alanları vardır.

### **2.2.2.1 İki foton soğurması**

İki foton soğurması, gelen yüksek şiddetli ışık demetinden iki fotonun eş zamanlı olarak soğurulması sonucu sistemin taban seviyesinden bir üst seviyeye geçişidir. Yarıiletken kristallerde iki foton soğurmasının gerçekleşmesi için gönderilen fotonun enerjisinin malzemenin yasak enerji bant aralığından küçük olması gerekir. Böylece değerlik bandındaki bir elektron iki fotonun enerjisini alarak iletkenlik bandına geçebilir. İki foton soğurması foton akısına değil şiddetine bağlıdır. Akı birim yüzeyden geçen enerji, şiddet ise birim zamanda birim yüzeyden geçen enerjidir.

Şekil 2.5'te iki foton soğurmasını açıklayan iki durum gösterilmiştir. Birincisinde aynı  $\omega$  frekansında iki fotonun eş zamanlı olarak soğurulması sonucu taban seviyesinden yaklaşık olarak rezonansa ( $2\omega$ ) geçiş sağlanır. İkincisinde ise  $\omega_e$  ve  $\omega_p$  frekanslarına sahip iki foton soğurularak taban durumundan yaklaşık olarak  $\omega_e + \omega_p$  rezonansa geçiş sağlanır. Bu durumdaki ilk alan (e alt indisli) uyarma ışını, ikincisi ise (p alt indisli) pompa ışını olarak adlandırılır. Her iki durumda da yasak enerji aralığındaki seviye sanaldır. Bu yüzden iki fotonun eş zamanlı olarak soğurulması gerekmektedir.



Şekil 2.5 İki foton soğurması

### 2.2.2.1.1 Tek ışınla iki foton soğurması

Bu durumda çizgisel olmayan soğurma şiddetin karesiyle orantılı olarak değişir. Işık malzemede yol alırken meydana gelen kayıp aşağıdaki eşitlikle verilmektedir (Sutherland vd. 2003):

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I - \beta I^2 \quad (2.2)$$

Burada  $\alpha$  safsızlıklardan kaynaklanan çizgisel soğurma katsayısı ve  $\beta$  iki foton soğurma katsayısıdır. İki foton soğurması katsayısı " $\beta$ " malzemeyi karakterize eden makroskobik bir parametredir. İki foton soğurma katsayısı ile üçüncü dereceden alınganlık arasındaki ilişki ise şu şekildedir (Sutherland vd. 2003):

$$\beta = \frac{3\pi}{\epsilon_0 n^2 c \lambda} \text{Im} \chi^{(3)} \quad (2.3)$$

$\chi^{(3)}$ 'ün sanal kısmından yararlanılarak çizgisel olmayan soğurma gücü belirlenir.

İki foton soğurması gibi nicelikleri belirlemek için  $\omega$  frekansındaki ışığa karşı malzemenin net geçirgenliğinden faydalanılır. Sürekli lazer veya atmalı lazer kullanımına bağlı olarak malzemenin geçirgenliği değişir. Her zaman ölçülen fiziksel

nicelik optik enerjidir. Böylece geçirgenlik ( $T$ ) geçen enerjinin gelen enerjiye oranı olarak adlandırılır. Gaussian atmalı lazer kullanıldığında malzemelerin geçirgenliği (Sutherland vd. 2003):

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha L}}{\sqrt{\pi q_0}} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln[1 + q_0 e^{-x^2}] dx \quad (2.4)$$

Burada ,  $q_0 = \beta(1-R)I_0 L_{eff}$ ,  $L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha}$  ve  $x=z/z_0$  ( $z_0$  Rayleigh aralığıdır).  $I_0$  malzeme üzerine gelen şiddet ve  $R$  malzemenin yüzeyindeki Fresnel yansımadır.

### 2.2.2.1.2 İki ışınla iki foton soğurması

Bu işlem farklı frekanslarda iki fotonun eş zamanlı olarak soğurulmasını içerir. Bu işlem, malzemelerde uyarılan elektronların ömürlerini (uyarılmış durumda kalma sürelerini) belirlemek için yapılan ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopisi deneylerinde kullanılmaktadır. Bunlar pompa veya uyarma frekansı ( $\omega_e$ ) ve geciktirilmiş diğer bir ışığın (gözlem) frekansı ( $\omega_p$ ) olarak belirlenirler. Her iki ışının şiddetleri karşılaştırılabilir derecede olmalıdır, fakat genelde  $I_p \ll I_e$  olur.

### 2.2.2.2 Doyurulabilir soğurma

Işığın şiddeti arttıkça soğurma katsayısı azalabilir. Bu durum uyarılmış enerji seviyelerinin dolmuş olmasından kaynaklanır. Durağan durum yaklaşımı altında yani atım süresi boyunca enerji seviyelerinin sayılanmasının sabit kaldığı durumda ölçülen soğurma katsayısı  $\alpha$ 'nın giriş şiddeti  $I$ 'ya bağlılığı  $I_s$  cinsinden şu şekildedir:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (2.5)$$

Burada  $\alpha_0$  çizgisel soğurma katsayısı,  $I_s$  doyum eşik şiddetidir. İki seviyeli sistemlerde doyurulabilir soğurma olayı uyarılan elektronun tekrar taban durumuna dönmesi için

geçen sürenin gönderilen lazer ışığının atma süresinden uzun olduğu zamanlarda gözlenir.

### 2.2.2.3 Serbest taşıyıcı soğurması

Yarıiletkenlerde çizgisel soğurma ile serbest taşıyıcı üretildiğinde, bu serbest taşıyıcılar fonon yardımcı soğurma yaparak iletim bandında daha yüksek seviyelere veya değerlik bandında daha düşük seviyelere geçebilirler. Bu işlem serbest taşıyıcı soğurması olarak adlandırılır. Serbest taşıyıcı soğurması durumunda şiddetteki değişim şu şekildedir (Sutherland vd. 2003):

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha_0 I - \sigma_c N_c(I) I \quad (2.6)$$

Burada  $N_c(I)$  şiddete bağlı taşıyıcı yoğunluğu,  $\sigma_c$  serbest taşıyıcı tesir kesitidir. Serbest taşıyıcı tesir kesiti yüksek frekans iletkenliğine  $\frac{1}{\omega^2}$  ile orantılı olarak katkıda bulunmaktadır, yani yarıiletkenlerde kırmızıaltı ışımalarda çok önemli bir yere sahiptir. Serbest taşıyıcı yoğunluğunun zamanla değişimi aşağıdaki denklem ile verilir:

$$\frac{dN_c}{dt} = \frac{\alpha I}{\hbar \omega} - \frac{N_c}{\tau_c} \quad (2.7)$$

Burada  $\tau_c$  elektron ile deşik birleşiminden kaynaklanan serbest taşıyıcı durulma süresidir.

Malzemeye gelen ışığın atma süresi taşıyıcı durulma süresinden kısa olduğu zaman eşitlik (2.7) deki ikinci terim ihmal edilebilir ve akıdaki azalmayı veren eşitliği elde etmek için eşitlik (2.6) ve (2.7) zaman üzerinden integre edilebilir:

$$\frac{dF}{dz} = -\alpha_0 \left( 1 + \frac{F}{2F_s} \right) F \quad (2.8)$$

Burada  $F_s = \hbar\omega / \sigma_c$  doyum akısıdır. Burada tanımlanan ara kesit ( $\sigma_c$ ) çizgisel soğurma tesir kesiti değil serbest taşıyıcı tesir kesitidir.

#### 2.2.2.4 Uyarılmış durum soğurması

Gelen ışığın şiddetinin malzemenin doyum şiddetinden çok büyük olduğu zaman uyarılmış durum önemli ölçüde doldurulmuş olabilir. Yarıiletkenler ve çok atomlu sistemlerde uyarılan seviyenin yakınında yüksek yoğunlukta seviyeler vardır. Uyarılan bir elektron taban seviyesi geri inmeden önce bu seviyelerden birisine hızlı bir geçiş yapabilir. Uyarılan seviyeden daha yukarıda seviyeler de vardır. Uyarılmış durumdaki elektron taban seviyesine inmeden önce bir foton soğurarak daha yukarıdaki seviyelere geçiş yapabilir. Bu işlem uyarılmış durum soğurması olarak adlandırılır.

Yarıiletkenlerde enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük olan bir foton soğurulduğunda bir elektron değerlik bandından iletkenlik bandına çıkar. İletkenlik bandının üstüne uyarılan bu elektron fazla enerjisini hızlı bir şekilde ortama vererek iletim bandının en altına iner. İletim bandında ise değerlik bandındaki deşikle birleşerek tekrar değerlik bandına iner. Fakat yeteri kadar yüksek şiddetlerde, elektron değerlik bandına inmeden yani iletkenlik bandındayken bir foton daha soğurabilir. Bu işlem ise uyarılmış durum soğurması olarak adlandırılır.

#### 2.2.2.5 İki foton yardımcı uyarılmış durum soğurması

Malzemede iki foton soğurması kuvvetli ise bu iki fotona izinli seviyenin önemli ölçüde dolmasına yol açar. Genellikle bu seviyeden daha yüksek seviyelere geçişlere izin verilir. Sönüm ve uyarılmış durum sayılanması aşağıdaki eşitlikle verilir (Sutherland vd. 2003):

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha I - \beta I^2 - \sigma NI \quad (2.9)$$

ve

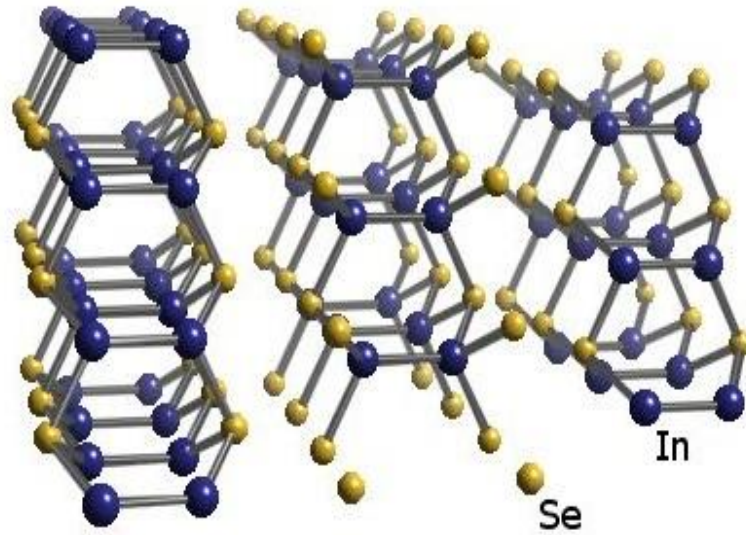
$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\beta I^2}{2\hbar\omega} - \frac{N}{\tau_1} \quad (2.10)$$

Burada  $\alpha$  safsızlıklardan kaynaklanan çizgisel soğurma katsayısı ve  $\tau_1$  iki fotonla uyarılan seviyenin ömrüdür. Kullanılan ışığın atma süresi  $\tau_1$ 'den çok büyükse eşitlik (2.10)'daki ikinci terim ihmal edilebilir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

InSe  $A^{III}-B^{VI}$  grubunda tabakalı yarıiletken ailesindedir. InSe Se-In-In-Se (Blasi vd. 1982, Ateş 2002) yapıda şekillenir. Her tabaka bir diğer tabakaya Van der Waals kuvvetiyle bağlıdır. InSe büyütülme koşullarına bağlı olarak hekzagonal veya rombohedral yapıda kristalleşebilir. Yarıiletkenler hem n- tipi hem de p- tipi olarak elde edilebilirler. Bu tez çalışmasında kullanılan InSe ve InSe:Ho kristalleri n-tipi iletkenlik göstermektedirler (Ateş 2002). İndiyum selen yapısı ilk olarak Schubert vd. (1954), tarafından incelenmiştir. Schubert vd. (1954) InSe kristalinin rombohedral yapıda büyüdüğünü belirlemişlerdir. Bridgman-Stockbarger metoduyla büyütülen numunelerin hekzagonal yapıya sahip oldukları Sugaike vd. (1957) tarafından bulunmuştur.

InSe kristali tabakalı yapıya sahiptir. Tabakalı yapılar anizotropik özelliklere sahiptirler. Tabakalar arasındaki Van der Waals bağı varken, tabakadaki atomlar birbirlerine iyonik veya kovalent bağ ile bağlanmışlardır. InSe oda sıcaklığında 1.3 eV' luk yasak enerji bant aralığına sahiptir. InSe ısıya ve ışığa duyarlıdır. Erime sıcaklığı 660 °C'dir. Güneş enerjisi ile çalışan alet yapımında, elektronik teknolojisinde kapasitör ve mikro batarya gibi mikro devre elemanlarında kullanılmaktadır (Ateş 2002). Şekil 3.1'de InSe kristalinin yapısı gösterilmektedir.

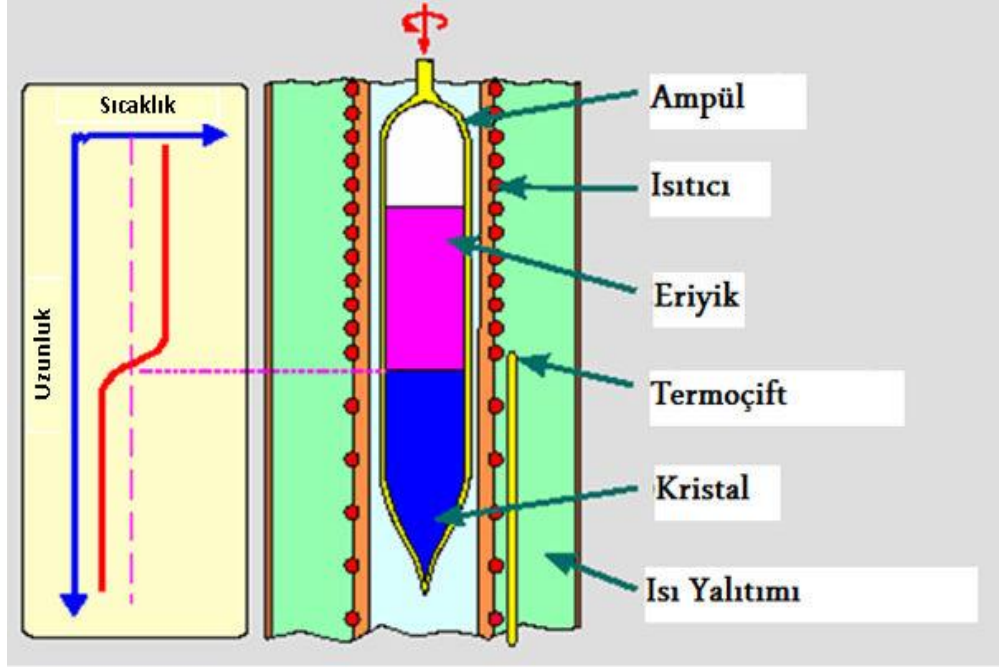


Şekil 3.1 InSe kristalinin yapısı

Yarıiletkenlerin optik ve fiziksel özelliklerini değiştirmek için katkılandırılabilir. Bu tez çalışmasında InSe kontrollü bir şekilde farklı oranlarda Ho ile katkılandırılmış ve katkılandırmanın çizgisel olmayan soğurma üzerine etkileri incelenmiştir. Tagiyev vd. (1985) Bridgman metoduyla büyüttüğü InSe tek kristali üzerinde eksiton soğurması ve elektrosoğurma deneyleri yanında Schotky diyotlar ve solar enerji dönüştürücü yapmaya çalışmıştır. 77-293 K sıcaklık aralığında Nd, Yb ve Er gibi nadir toprak elementleri ile katkılandırılan InSe'de fotoluminesans (PL) ve fotoiletkenlik deneyleri ile katkılandırmanın etkisi araştırılmıştır. InSe tek kristaline %0.05- %0.1 arasında nadir toprak elementleri katılanmış ve katkının kristal yapısında meydana getirdiği değişiklikler 1020-1060 nm dalga boyu aralığında PL piklerini daralttığı gözlenmiştir. Elde edilen PL bantlarının yoğunluğu 50 ile 100 kez daha fazla olup şiddet artarken bantların yarı genişliği azalmıştır. PL pikinin enerji durumu daha düşük enerjili bölgede değişmiştir. PL deneyleri sonucunda katkısız InSe kristalinde gözlenen safsızlık pikleri nadir toprak elementi katılan InSe kristallerinde ya çok azalmış ya da gözlenememiştir. Bildiğimiz kadarı ile literatürde katkılandırmanın InSe kristalinin çizgisel olmayan soğurma özelliklerine etkisi henüz araştırılmamıştır.

### **3.1 Dikey Bridgman-Stockbarger Yöntemi**

Tek kristal büyütmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi dikey Bridgman-Stockbarger yöntemidir. Şekil 3.2'de Bridgman fırının şematik gösterimi verilmiştir. Bu yöntemde kristal, iyi belirlenmiş bir sıcaklık eğrisine sahip iki veya üç bölgeli düşey durumda bir büyütmeye fırını kullanılarak büyütülür. Büyütülecek olan malzeme kuartz ampul içerisine yerleştirilir. Ampule yerleştirilen malzeme kristal büyütmeye fırınının sıcak bölgesinde eriyik halindedir. Kristalleşme sürecinin başlaması için fırın ile ampul arasında büyütmeye ampulünün alt ucunda sıcaklık azalmasıyla sonuçlanan göreceli bir hareket başlar. Tüm kristal oluşuncaya kadar daha fazla hareketle çok daha fazla materyal katılır. Bu işlem sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametre fırın ve ampuldeki sıcaklık dağılımıdır.



Şekil 3.2 Bridgman fırınının şematik gösterimi

Bu tez çalışmasında kullanılan InSe ve farklı katkı oranlarındaki InSe:Ho kristalleri Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü'nde (Ateş 2002) dikey Bridgman-Stockbarger metodu kullanılarak büyütülmüştür. Büyütülen bir InSe:Ho kristalinin bir kesiti şekil 3.3'de verilmiştir. Bu kristallerin amorf yapıdaki ince filmleri ise vakum altında ısısal buharlaştırma yöntemiyle Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü'ndeki optik malzemeler araştırma laboratuvarında elde edilmiştir.

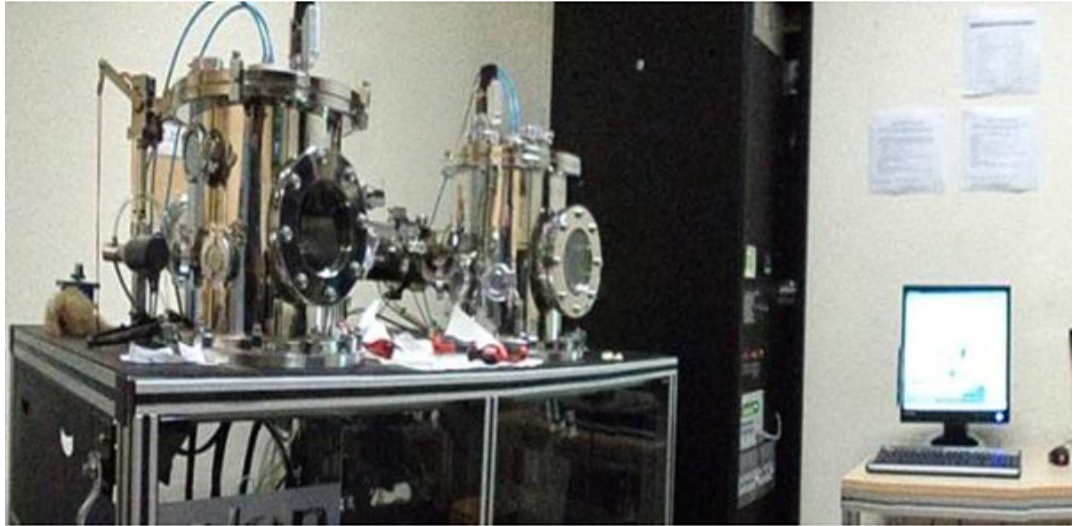


Şekil 3.3 InSe:Ho kristalinin bir kesiti (foto, 2011)

### 3.2 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma Yöntemi

İnce film büyütme yöntemlerinden bir tanesi ısısal buharlaştırma yöntemidir. Önce buharlaştırma bölümündeki hava boşaltılarak istenen vakuma ulaşılır. Bu yöntemde katı haldeki malzeme, üzerinden akım geçirilen bir kaşığa yerleştirilir. Geçen akım ile ısınan kaşıktan buharlaşan malzeme üst taraftaki alttaş üzerine gider. Buhar halindeki tanecikler enerjilerinin büyük bir bölümünü alttaş ile paylaşarak soğurlar ve alttaş üzerinde katı hale geçerler. Malzeme buharlaştıkça tanecikler birbirlerinin üzerine eklenirler. Böylece istenilen kalınlıkta ince film elde edilebilir.

InSe ve InSe:Ho ince filmleri şekil 3.4'te gösterilen vakum altında ısısal buharlaştırma yöntemiyle laboratuvarımızda büyütülmüştür. Bu sistemde  $8 \times 10^{-6}$  Torr basınca hızlı bir şekilde inilebilmektedir. Bu sistemde ince film büyütme sistemi bilgisayar kontrollü olarak yapılmaktadır. Böylece ayarlanabilen parametrelerle ince film büyütülebilmektedir. Sistemdeki kalınlık dedektörü sayesinde büyütülen ince filmlerin kalınlığı hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu şekilde istenilen kalınlıkta ve hızda kontrollü bir şekilde ince filmler elde edilebilmektedir.



Şekil 3.4 Vakum altında ısısal buharlaştırma sistemi (foto, 2011)

### 3.2.1 InSe ve InSe:Ho ince filmlerinin büyütülmesi

InSe ve InSe:Ho kristalleri küçük parçalar halinde kesilerek hassas terazide tartıldılar. InSe kristalinden, 48, 58, 70, 80 nm kalınlıklarında ince filmler büyütüldü. Bu ince filmleri büyütme için sırasıyla 0.0075gr, 0.0093gr, 0.0116gr, 0,0128gr malzeme tartıldı. Farklı katkı oranlarındaki InSe:Ho kristallerinden 48nm ve 58 nm kalınlıklarında ince filmler büyütüldü. Tartılan malzemeler molibden kaşık üzerine yerleştirildi. Filmlerin üzerine büyütüleceği alltaşlar büyütme işleminden önce temizlendiler ve oksitlenmenin önüne geçmek için azot gazına maruz bırakıldılar. Temizlenen alltaşlar buharlaştırma sistemi içindeki molibden kaşıktan 12.5 cm yukarıdaki alltaş tutucuya yerleştirildiler. Daha sonra vakum odasının basıncı  $5 \times 10^{-5}$  Torr basınca getirildi. Malzemenin yerleştirildiği kaşık üzerinden geçirilen akım 11 amperden (A) başlayarak kontrollü bir şekilde arttırıldı. Kaşık 43 amperde kızarmaya başladı. Kaşık kızarmaya başladıktan sonra üzerinden geçirilen akım daha küçük aralıklarla arttırıldı. Malzemenin büyüme hızı 0.5 Å/s olacak şekilde kaşık üzerinden geçirilen akım ayarlandı. Kalınlık dedektöründen okunan kalınlık istenilen değere ulaştığında kaşık üzerinden geçirilen akım kesilerek büyütme işlemi sonlandırıldı. Şekil 3.5' te fused silika alltaş üzerine büyütlen InSe: Ho ince filmi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Fused silika üzerine büyütülmüş InSe:Ho ince filmi (foto, 2011)

### 3.3 Yarıiletkenlerde Çizgisel Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Madde üzerine sürekli spektruma sahip bir ışık demeti gönderilerek ortamdaki çıkan ışığı dalga boylarına bağlı olarak inceleyerek maddenin yapı analizini yapmak mümkündür. Bu analiz *soğurma spektroskopisi* olarak adlandırılır. Soğurma spektroskopisinden yarıiletken bir malzemenin çizgisel soğurma katsayısı ve yasak enerji bant aralığı belirlenebilir. Yarıiletkenlerde çizgisel soğurma katsayısı iki farklı durum için iki farklı şekilde belirlenir. Kristal yapıdaki yarıiletkenler için soğurma katsayısı (Urbach 1953):

$$\alpha = \frac{[A(E - E_g)^n]}{hv} \quad (3.1)$$

ile verilir. Burada  $A$  bir sabit,  $hv$  uygulanan dalgaboyundaki fotonun enerjisi ve  $E_g$  ise yasak enerji aralığını verir. Burada direk izinli geçişler için  $n=1/2$  değerini alır. Direk izinsiz geçişler için ise  $n= 3/2$  değerini alır. İndirek izinli geçişler için  $n= 2$  değerini alır. İndirek izinsiz geçişler için ise  $n= 3$  değerini alır.

Hem kristal hem de amorf yapıdaki yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı belirlenirken, eşitlik (3.1)'den yararlanır. Soğurma spektrumundan  $\alpha$ 'yı hesapladıktan sonra  $hv$ ' ye karşılık  $(\alpha hv)^n$  grafiği çizdirilir. Soğurma eğrisi ile çakışık bir çizgi çizdirilip, bu çizgi  $hv$  eksenine indirilir. Çizginin  $hv$  ekseninde kestiği nokta o yarıiletkenin yasak enerji aralığının değerini verir.

Bu tez çalışmasında kullanılan yarıiletken malzemelerin çizgisel soğurma özellikleri şekilde gösterilen çizgisel soğurma spektrometresi (Shimadzu UV-1800) ile elde edilmiştir. Bu çizgisel soğurma spektrometresi ile morötesi (190 nm) ile kızılötesi (1100 nm) arasındaki bölgenin çizgisel soğurma spektrumu alınabilmektedir.



Şekil 3.6 Çizgisel soğurma spektrometresi (foto, 2011)

Kristallerin çizgisel soğurma spektrumu alınırken spektrumun alınacağı bölge malzeme yok iken tarandı. Bu işlemden sonra malzeme spektrometrenin içine yerleştirildi ve yine aynı spektrum bölgesi tarandı. Spektrumların farkı alınarak ortamdaki gürültü yok edilmiş oldu.

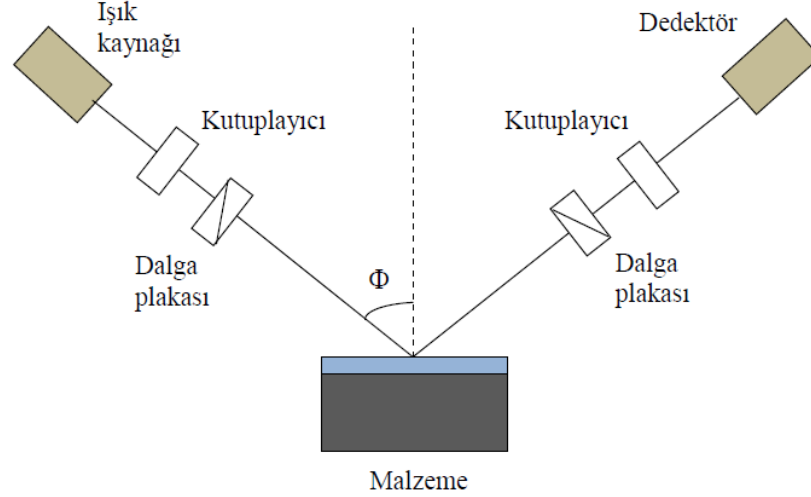
Amorf haldeki ince filmlerin çizgisel soğurma spektrumları alınırken ise alttaşdan kaynaklanabilecek etkileri yok etmek için referans spektrumu alındı. Bunu yapmak için ise önce hem malzemenin hem de referans konulacak yere yariletken ince filmlerin üzerine büyütüldüğü fused silika alttaşlar koyularak spektrum bölgesi tarandı. Daha sonra malzemenin konulacağı yerden alttaş alınıp yerine büyütülen ince film koyuldu ve spektrum bölgesi tekrar tarandı. Ölçülen soğurma spektrumları bulgular kısmında verilmiştir.

### **3.4 Malzemelerin Kalınlıklarının Belirlenmesi**

Çizgisel olmayan soğurma katsayısının belirlenebilmesi için bilinmesi gereken parametrelerden birisi malzemelerin kalınlığıdır. Kristal halindeki malzemelerin kalınlığını belirlemek için optik mikroskop veya taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılabilir. İnce filmlerin kalınlıklarını belirlemek için ise spektroskopik elipsometre kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan InSe:Ho külçe kristallerinin kalınlıkları Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü'nde taramalı elektron mikroskobu kullanılarak belirlendi. İnce filmlerin kalınlıkları ise şekil 3.8'de gösterilen elipsometre kullanılarak belirlendi.

Elipsometre ile malzemelerin kalınlık, kırılma indisi ve sönüm katsayısı gibi özellikleri malzeme üzerinden yansıyan ışıktaki kutuplanma değişiminden belirlenebilir. Şekil 3.7'de spektroskopik elipsometrenin şematik bir gösterimi yer almaktadır. Işık kaynağından çıkan bir kutuplayıcı tarafından çizgisel kutuplanmış ışık dalga plakasından geçirildikten sonra malzeme üzerine düşürülür. Malzemeden yansıyan ışık önce dalga plakası ve daha sonra analizörden geçirilerek dedektöre düşürülür. İncelenen ince filmde yansıyan ışığın kutupluluğundaki değişim malzemenin optik sabitleri ve kalınlığı ile ilgili bilgi vermektedir.



Şekil 3.7 Spektroskopik elipsometrenin şematik gösterimi

Malzeme üzerine gelen ışık s ve p bileşenine ayrılmış bir kutupluluk durumunda olmalıdır. Yansıyan ışığın s ve p bileşenlerinin genliklerinin, gelen ışığın s ve p bileşenlerinin genliklerine oranı Fresnel yansımaya katsayıları ( $r_s$  ve  $r_p$ ) ile verilir. Elipsometrenin çalışma prensibi kompleks Fresnel yansımaya katsayılarının oranlarını ölçmeye dayanır. Kompleks yansımaya oranı ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (3.2)$$

İle verilir. Burada  $\tan \psi$  yansıma üzerindeki genlik oranı ve  $\Delta$  faz kaymasıdır. Frensel eşitlikleri kullanılarak hesaplanan  $\psi$  ve  $\Delta$  değerleri ile, deneysel ölçümlerin en iyi şekilde uyduğu malzemenin çizgisel kırılma indisi, sönüm katsayısı ve kalınlığı belirlenir.

Bütün ince filmler 370- 990 nm dalgaboyu aralığında 65°, 70°, 75° açılarda ışık gönderilerek incelendi. Farklı açılarda ışık gönderilerek ölçüm doğruluğu artırıldı.



Şekil 3.8 Spektroskopik elipsometre (foto, 2011)

### 3.5 Çizgisel Olmayan Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi

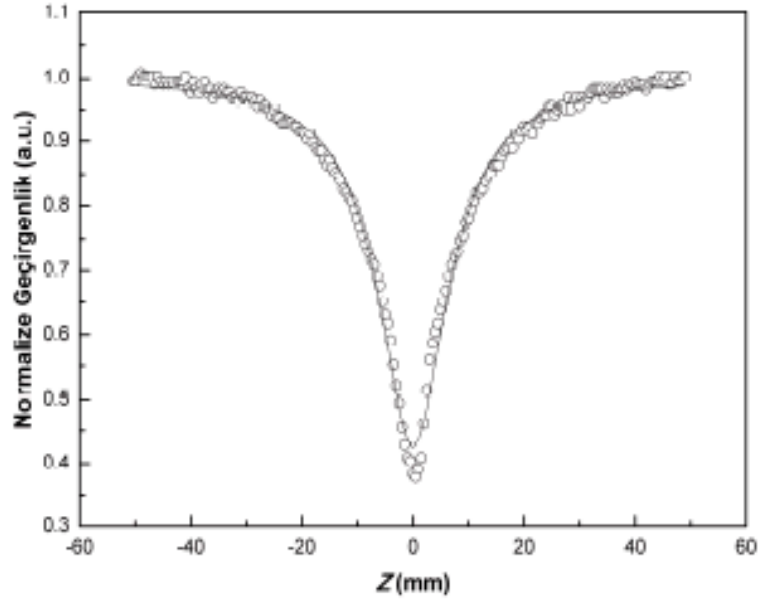
#### 3.5.1 Z-tarama tekniği

Z-tarama tekniği ile malzemelerin çizgisel olmayan soğurma ve kırılma katsayıları belirlenir. Bu tekniğin uygulanabilirliğinin kolay olması ve malzemelerin çizgisel

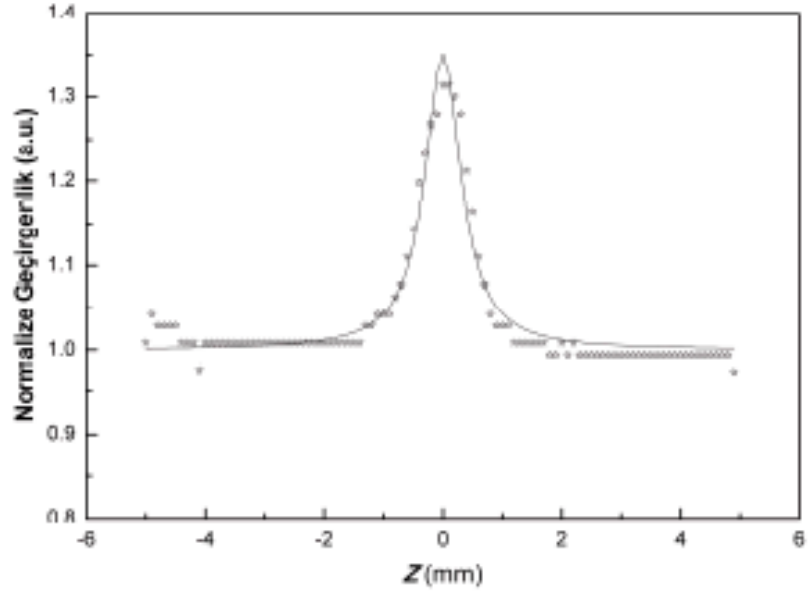
olmayan soğurma ve kırılma değerlerinin büyüklüğünün yanı sıra işaretlerinin de belirlenebilmesi, bu tekniğin yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur. Bu teknik ilk olarak Bahae ve arkadaşları tarafından bulunmuştur (Bahae vd. 1990). Bu teknik, açık yarık z-tarama tekniği ve kapalı yarık z-tarama tekniği olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Kapalı yarık z-tarama tekniğinde malzemelerin çizgisel olmayan kırılma indisi belirlenirken, açık yarık z-tarama tekniğinde malzemelerin çizgisel olmayan soğurma özellikleri belirlenir.

### **3.5.1.1 Açık yarık z-tarama tekniği**

Şekil 3.11'de açık yarık z-tarama deney düzeneği gösterilmiştir. Lazer kaynağından çıkan Gaussian profiline sahip bir ışık ince kenarlı bir mercekle yardımcıyla malzeme üzerine düşürülür. Malzemedan geçen ışığın tamamı başka bir ince kenarlı mercekle yardımcıyla dedektör üzerinde toplanır. Malzeme hareketli bir platform üzerine yerleştirilir. İlk mercekten geçen ışık malzeme üzerine düşerken malzeme de mercekten uzaklaşacak şekilde +z yönünde hareket ettirilir. Odak noktasında ışığın çapı en küçük olduğu için şiddetin en yüksek olduğu nokta bu noktadır. Odaktan uzaklaştıkça malzeme üzerine düşen ışığın şiddeti azalır. Malzeme bu şekilde hareket ettirilerek farklı şiddetlere maruz bırakılır. Malzemenin bu hareketi sırasında şiddetin düşük olduğu yani odaktan uzak olunan noktalarda çizgisel soğurma meydana gelebilir. Malzeme odağa yaklaştıkça yani şiddetli bölgelerde çizgisel soğurmaya ek olarak çizgisel olmayan soğurma da katkıda bulunabilir. Bu durumda dedektör üzerine düşen enerjide bir azalma meydana gelir. Malzeme odağa gelene kadar dedektör üzerine düşen enerjideki azalma devam eder. Malzeme odağı geçtikten sonra malzeme üzerine düşen şiddet gittikçe azalacağından çizgisel olmayan soğurma katkısı giderek azalır ve sonunda yine sadece çizgisel soğurmanın etkisi gözlenir. Böyle bir durumda dedektör üzerine düşen enerji 1'e normalize edilir ve şekil 3.9'daki gibi bir grafik elde edilir. Bu etki çizgisel olmayan soğurma etkisi olarak adlandırılır ve bu etkiye tek foton soğurması, iki foton soğurması, ardışık foton soğurması ve serbest taşıyıcı soğurması katkıda bulunur.



Şekil 3.9 Çizgisel olmayan soğurma grafiği

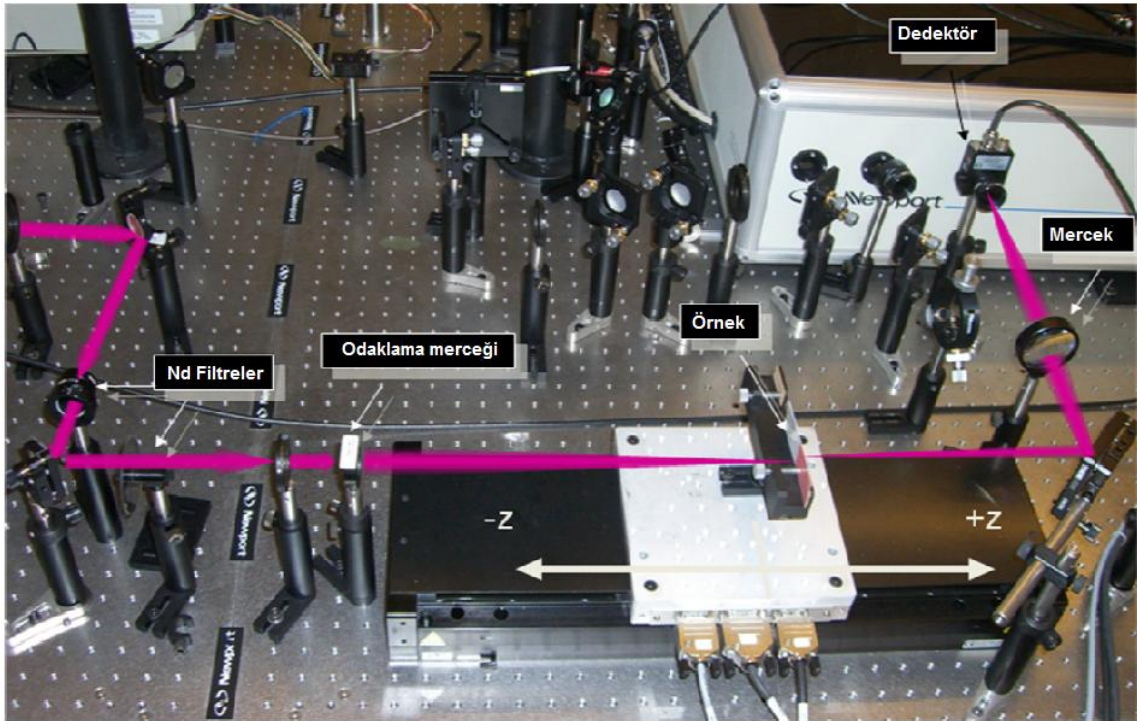


Şekil 3.10 Doyurulabilir soğurma grafiği

Bir başka durum ise şiddetin yüksek olduğu odak noktasına doğru gidildikçe dedektör üzerine düşen enerjide bir artma meydana gelmesidir. Odak geçilip düşük şiddetli yani çizgisel etkinin gözleneceği bölgeye doğru ise dedektör üzerine düşen enerji de bir azalma meydana gelir. Bu durumda ise yine dedektör üzerine düşen enerji 1'e normalize

edilir ve şekil 3.10'daki gibi bir grafik elde edilir. Bu etki ise doyurulabilir soğurma olarak adlandırılır.

Bu tez çalışmasında kullanılan InSe:Ho kristallerinin ve amorf ince filmlerinin aynı zamanda InSe amorf ince filmlerinin çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma özellikleri yukarıda anlatılan açık yarık z-tarama deneyi ile belirlenmiştir. Kristaller, 4 ns atma süreli, 1064 nm dalgaboylu ve 10 Hz frekanslı, neodmiyum katkılı yitrium-aluminyum garnat (Nd:YAG) lazeri (Quantel Brilliant) ve 65 ps atma süreli, 1064 nm dalgaboylu ve 10 Hz frekanslı Nd:YAG lazeri (Continuum Leopard SV) ile incelenmiştir. Amorf yapıdaki ince filmler ise 65 ps atma süreli lazer ile incelenmiştir. Yapılan bütün deneylerde odaklama merceği olarak 20 cm odak uzaklıklı ince kenarlı mercek kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Açık yarık z-tarama deney düzeneği (foto, 2011)

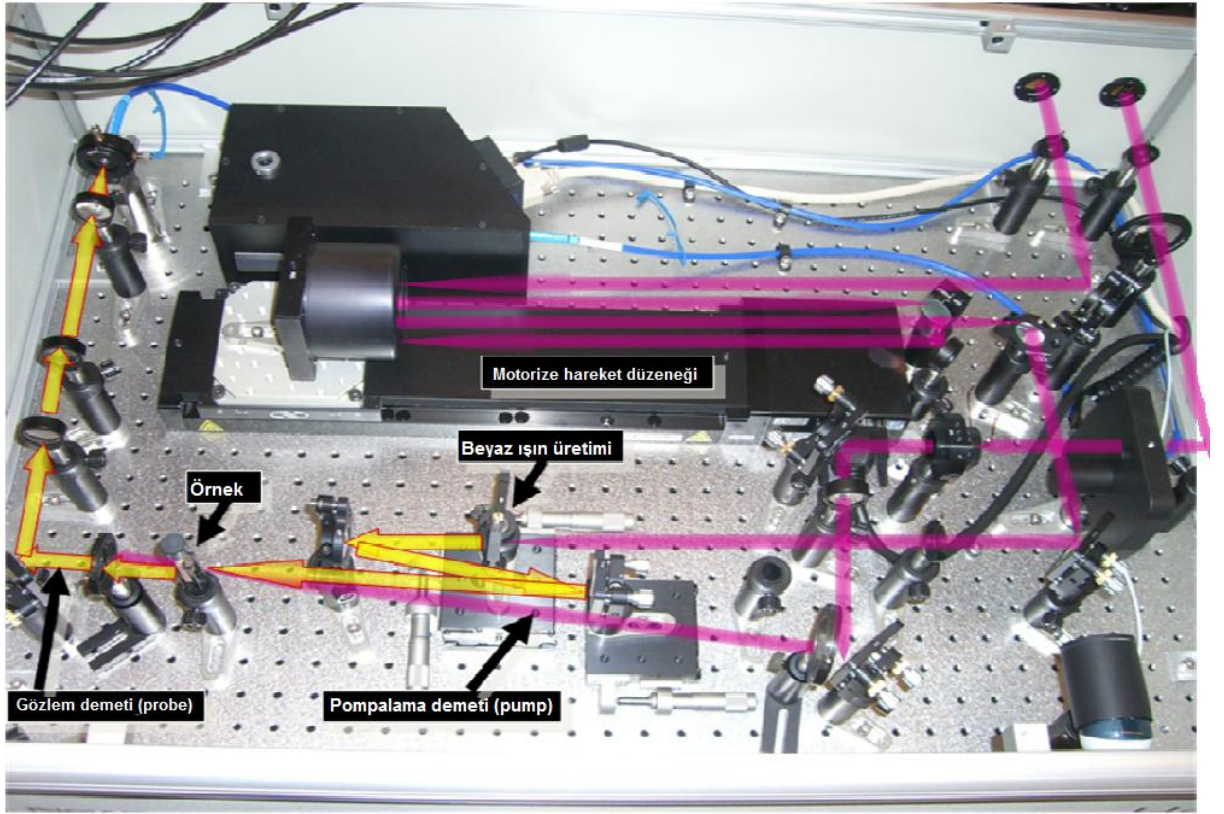
### 3.6 Ultra Hızlı Pompa-Gözlem Spektroskopisi Tekniği

Ultra hızlı spektroskopisi tekniği malzemedeki elektronların uyarılabileceği seviyeleri ve elektronların bu uyarılmış durumlarda kalma sürelerini belirlemek için kullanılır. Bu teknikte incelenen malzemenin elektronları şiddetli bir pompa ışını ile taban seviyesinden bir uyarılmış seviyeye uyarılırlar. Daha zayıf şiddette geciktirilmış bir ışın elektronlar uyarılmış seviyede iken gönderilerek bu uyarılmış seviyedeki elektronların daha üst seviyeye çıkmaları sağlanır. Pompa ile beyaz ışın aynı anda ve malzeme üzerinde aynı noktaya düşürülmelidir. Gönderilen beyaz ışın spektrumu incelenerek beyaz ışıandan pompanın etkisi ile soğurulan dalgalıyları yardımıyla elektronların uyarılabilecekleri seviyeler belirlenir. Beyaz ışın geciktirilmış olarak gönderildiği için pompanın çıkardığı uyarılmış seviyedeki elektronların bir kısmı daha beyaz ışın gelmeden taban seviyesine inebilir. Beyaz ışın geciktirme işleminin üzerine ters yansıtıcı ayna monte edilmiş adım motoru hareket ettirilerek beyaz ışının daha fazla yol alması ile sağlanır. Beyaz ışın giderek daha fazla geciktirileceği için beyaz ışık ile karşılaşmadan taban seviyesine inen elektronların sayısında bir artış olur. Bu durumda uyarılmış seviyeden daha üst seviyelere uyarılan elektronların sayısında ise üstel bir azalma olur. Beyaz ışık atmalarının geciktirilme işleminin uyarılmış seviyeden daha üst seviyelere uyarılabilecek elektron kalmayana kadar devam eder. Yani bu durumda bütün elektronlar geciktirilmış beyaz ışık atması ile karşılaşmadan taban seviyesine inmiş olurlar. Beyaz ışık spektrumunda bir dalgalıyunda meydana gelen soğurmanın zamanla azalışı üstel düşüş ifadesi ile artılarak bu dalgalıyuna karşı gelen seviyenin ömrü belirlenir. Artırım işleminin yapılırken eşitlik 3.3'ten yararlanıldı. Ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopisi kullanılarak yarıiletkenlerde iletim bandının üstüne uyarılan elektronların enerjisini kaybederek iletim bandının ortasına inme süresi, iletim bandından değerlik bandına doğrudan inme süresi ve iletim bandından değerlik bandına katkı veya kusur seviyelerine yakalanarak inme süresi belirlenebilir.

$$\Delta A = -\log(10^{-S} - 10^{-S(t<0)} + 1) \quad (3.3)$$

Burada  $S$  deneysel olarak gözlenen  $\Delta A$  ve  $S(t<0)$  zamanda sıfır noktasından önce deneysel olarak gözlenen  $\Delta A$ 'dır. Zamanda sıfır noktası, pompa ile gözlem ışınının tam aynı anda geldiği zamandır.

Şekil 3.12'de bu tez çalışmasında kullanılan ince filmlerin ömürlerinin ölçüldüğü ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopisi (Spectra Physics, Helios) deney düzeneği gösterilmiştir. Bu deneyde pompa ışını olarak 800nm dalgaboylu, 1kHz frekanslı ve 200 fs atma süreli lazer ışığı kullanıldı. Sonda ışını olarak ise safir plakadan üretilen beyaz ışık kullanıldı.



Şekil 3.12 Ultra hızlı spektroskopisi deney düzeneği (foto, 2011)

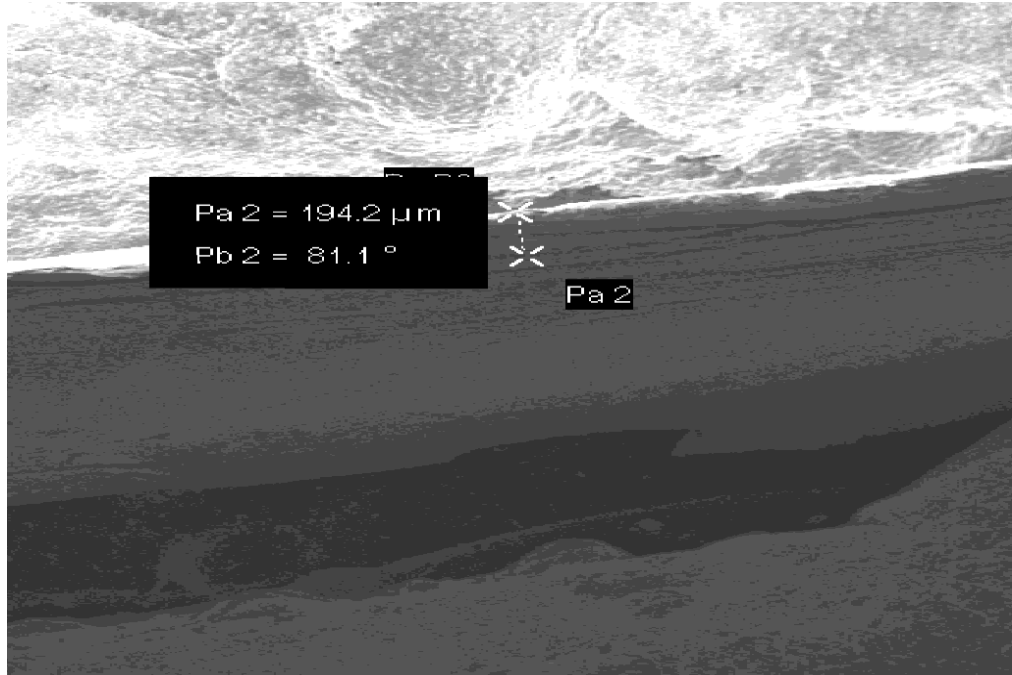
## 4. BULGULAR

Bu bölümde farklı katkı oranlarında katkılı InSe:Ho kristallerinin, onların amorf ince filmlerinin ve InSe amorf ince filmlerinin açık yarık z-tarama deneylerinden elde edilen çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma verileri, bu verilerin arıtımının yapılabilmesi için gerekli olan çizgisel soğurma spektrumları, yasak enerji bant aralıkları ve kalınlıkları gibi fiziksel ölçüm sonuçları yer almaktadır.

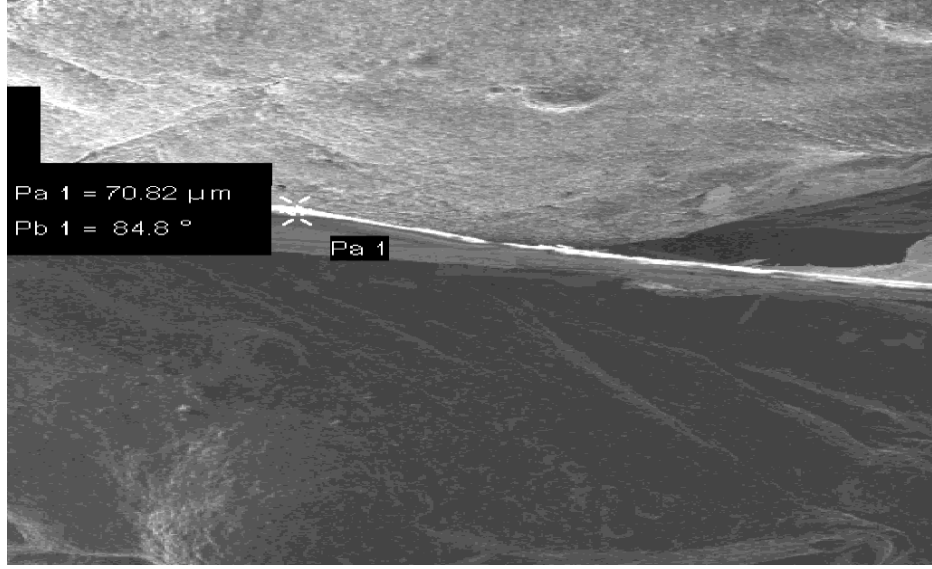
### 4.1 Kristallerin Ölçüm Sonuçları

#### 4.1.1 Kristallerin kalınlıkları

%0.005 ve %0.05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin kalınlıkları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak belirlendi. Şekil 4.1-4.2’de taramalı elektron mikroskobundan elde edilen ölçüm sonuçları yer almaktadır. Malzemeler yatay bir tutucuya dik olarak yerleştirilmiş ve kamera ile üstten malzemelerin kesitine bakılarak kalınlıkları belirlenmiştir.



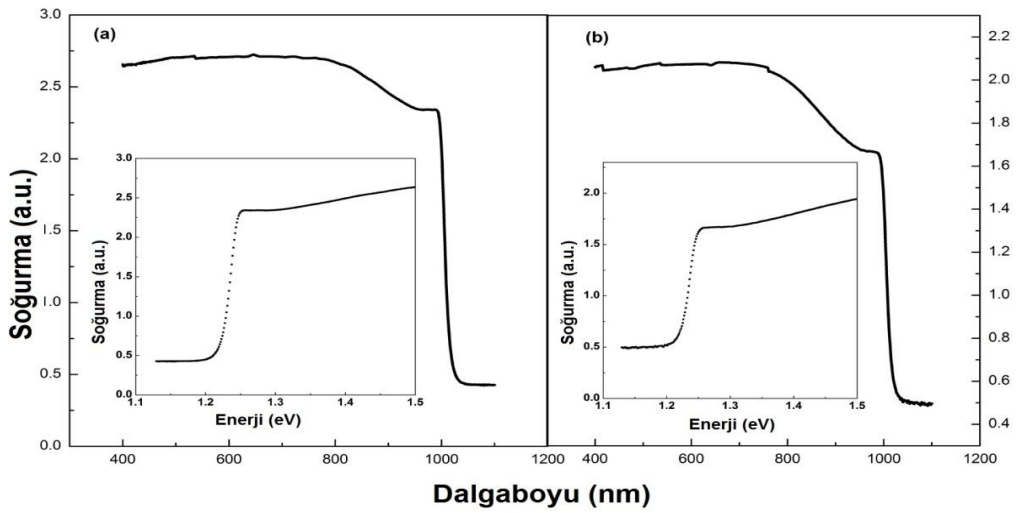
Şekil 4.1 %0,005 Ho katkılı InSe:Ho kristalinin SEM görüntüsü



Şekil 4.2 %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristalinin SEM görüntüsü

#### 4.1.2 Kristallerin çizgisel soğurma spektrumları

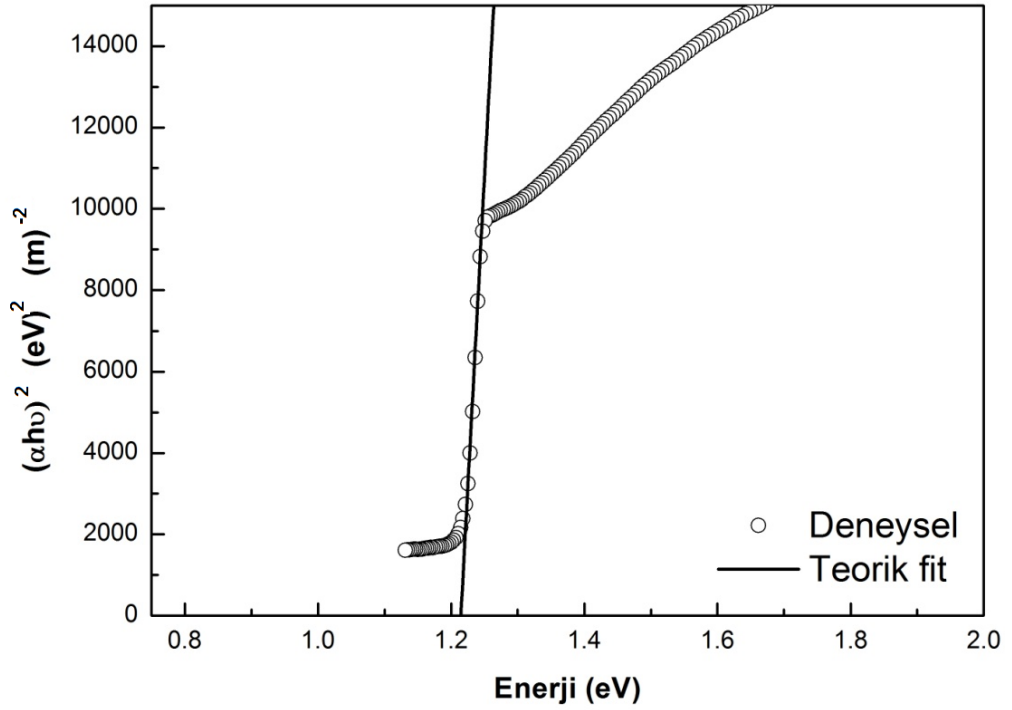
Şekil 4.3'te incelenen InSe:Ho kristallerinin çizgisel soğurma spektrumları gösterilmektedir.



Şekil 4.3.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin çizgisel soğurma spektrumları

### 4.1.3 Kristallerin yasak enerji aralıkları

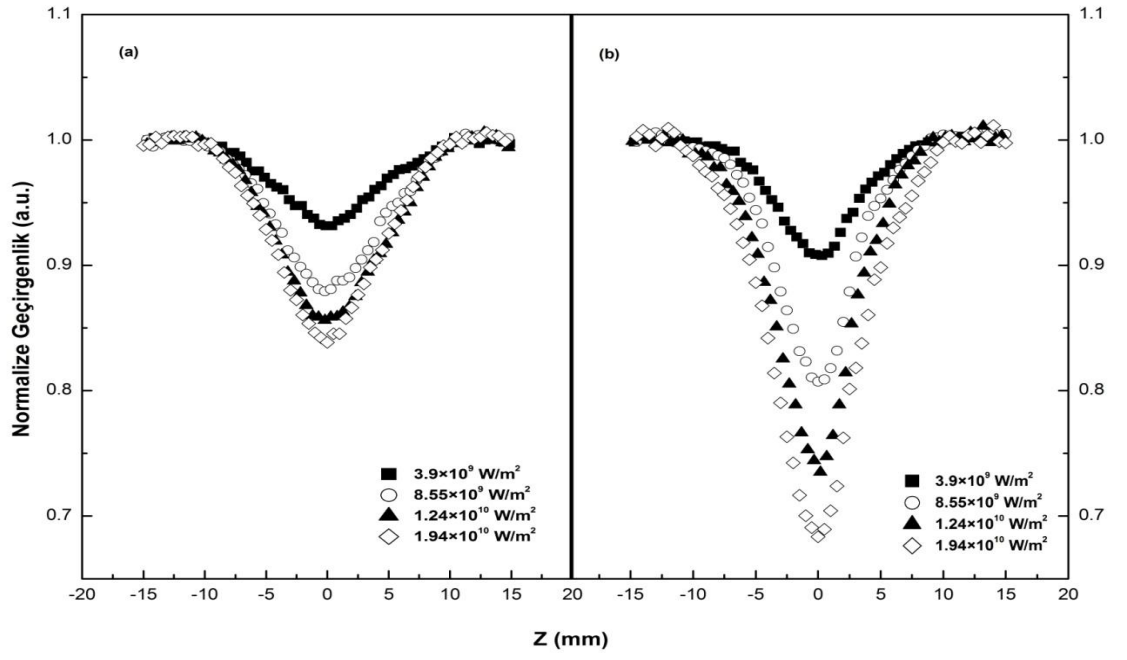
Yarıiletkenlerde yasak enerji aralıklarının çizgisel soğurma spektrumu kullanılarak hesaplandığından daha önce bahsetmiştik. InSe:Ho kristalinin yasak enerji bant aralığı eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplandı ve bu eşitlikte  $n=1/2$  olarak alındı. Yasak enerji bant aralıkları belirlenirken yapılan arıtım şekil 4.4'te verilmektedir.



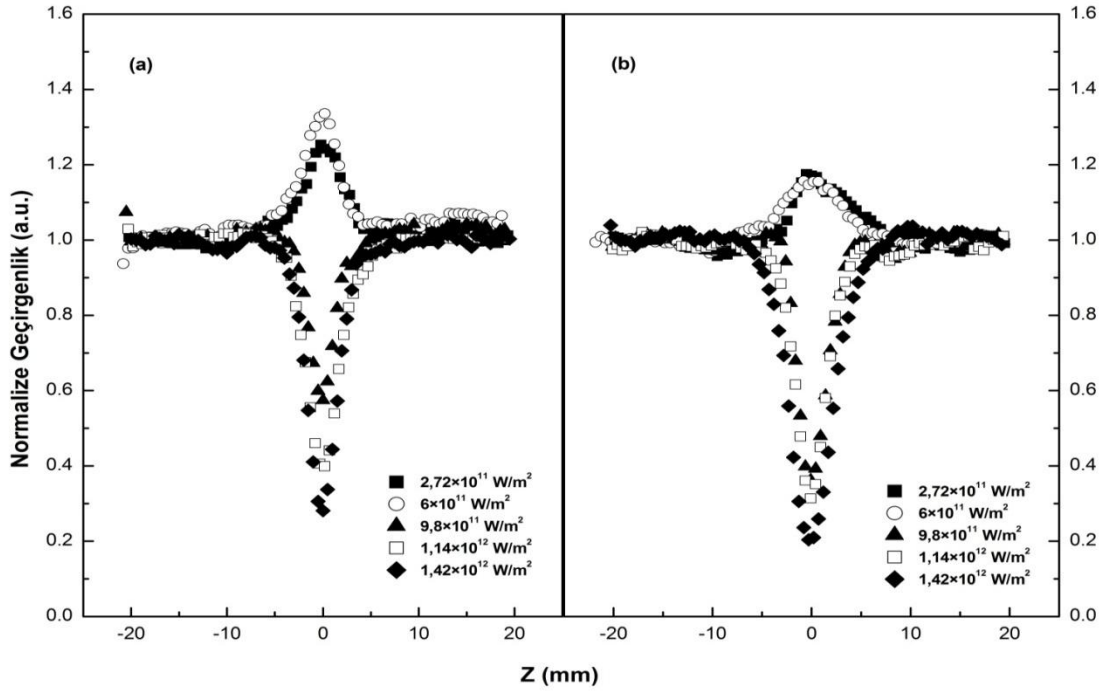
Şekil 4.4 InSe:Ho kristalinin yasak enerji bant aralığının hesaplanması

### 4.1.4 Kristallerin çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma özellikleri

InSe:Ho kristallerinin nanosaniye ve pikosaniye atmalı lazer kaynakları kullanılarak yapılan açık yarık z-tarama deneylerinden elde edilen çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma grafikleri şekil 4.5-4.6'da verilmektedir.



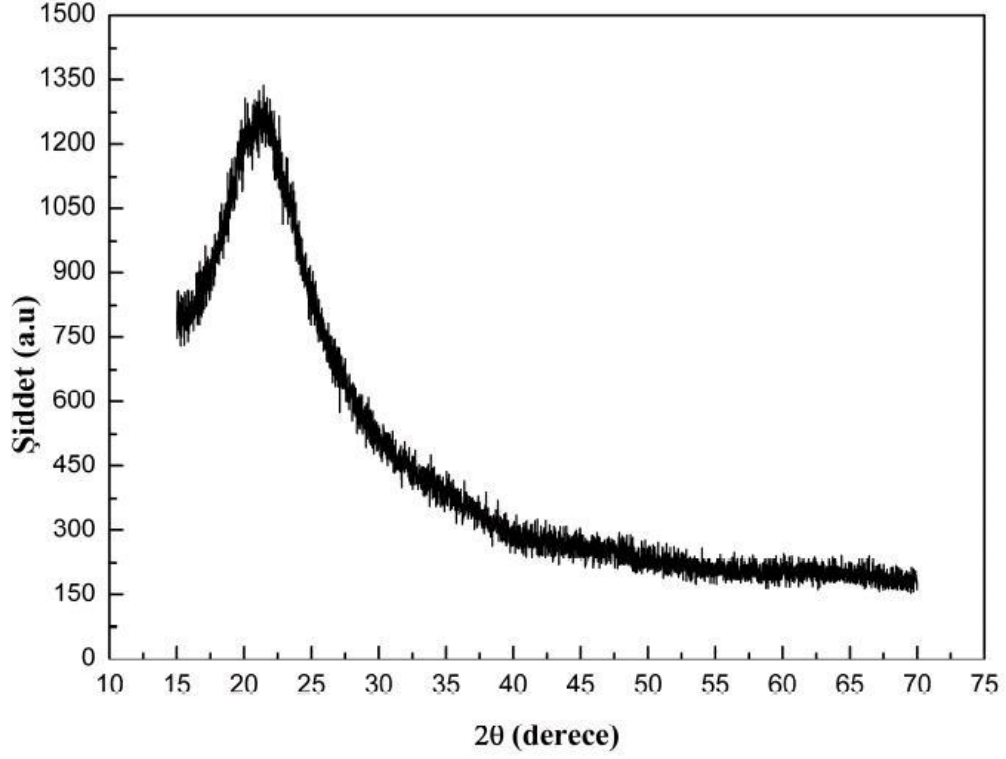
Şekil 4.5.a. %0,005 Ho katkı, b. %0,05 Ho katkı InSe:Ho kristallerinin nanosaniye açık yarıık z-tarama grafikleri



Şekil 4.6.a. %0,005 Ho katkı, b. %0,05 Ho katkı InSe:Ho kristallerinin nanosaniye açık yarıık z-tarama grafikleri

## 4.2 Amorf İnce Filmlerin Ölçüm Sonuçları

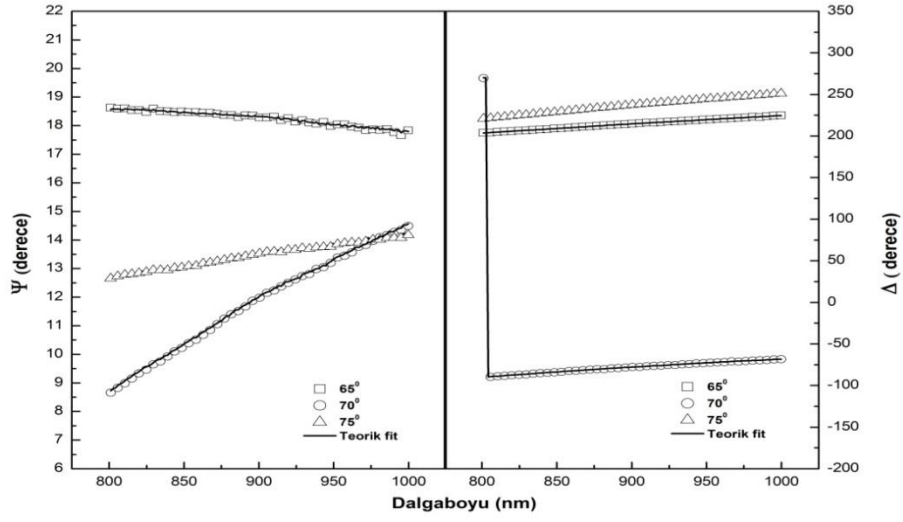
### 4.2.1 Amorf ince filmin XRD sonucu



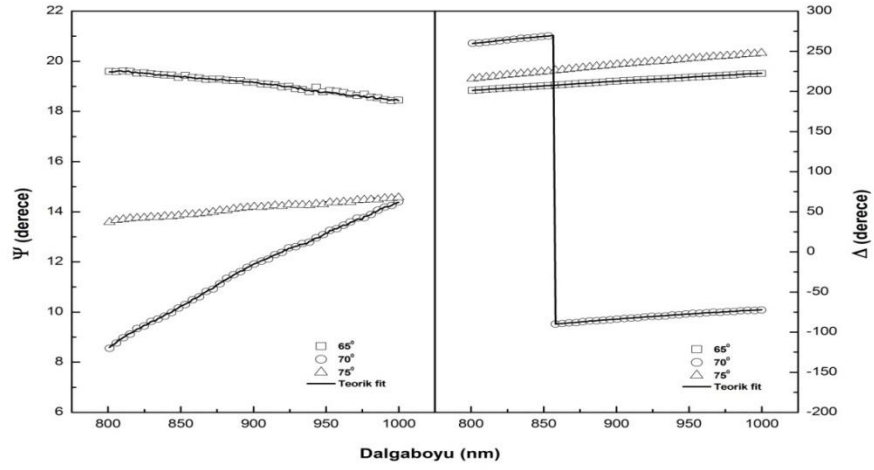
Şekil 4.7 58 nm kalınlığındaki %0,1 Ho katkılı InSe:Ho amorf ince filminin XRD verisi

### 4.2.2 Amorf ince filmlerin kalınlıkları

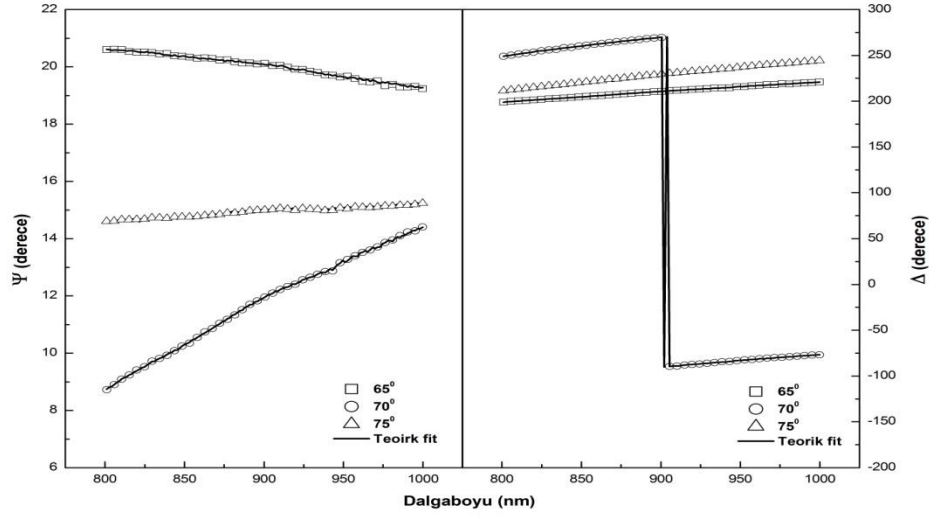
Bu tez çalışmasında kullanılan amorf ince filmlerin kalınlıkları spektroskopik elipsometre kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.8-4.12 spektroskopik elipsometreden elde edilen  $\psi$  ve  $\Delta$  parametrelerinin dalgaboyuna bağlı grafikleri görülmektedir.



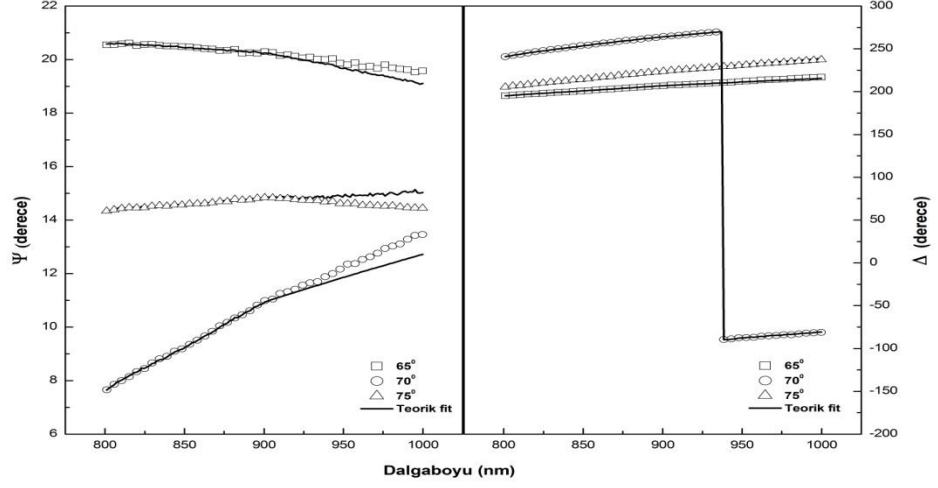
Şekil 4.8 58 nm kalınlığındaki InSe ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri



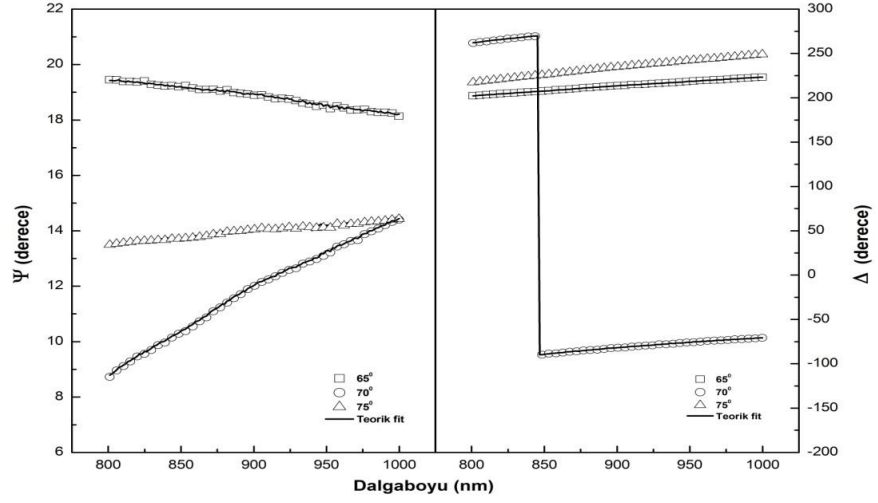
Şekil 4.9 58 nm kalınlığındaki %0,005 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri



Şekil 4.10 58 nm kalınlığındaki %0,01 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri



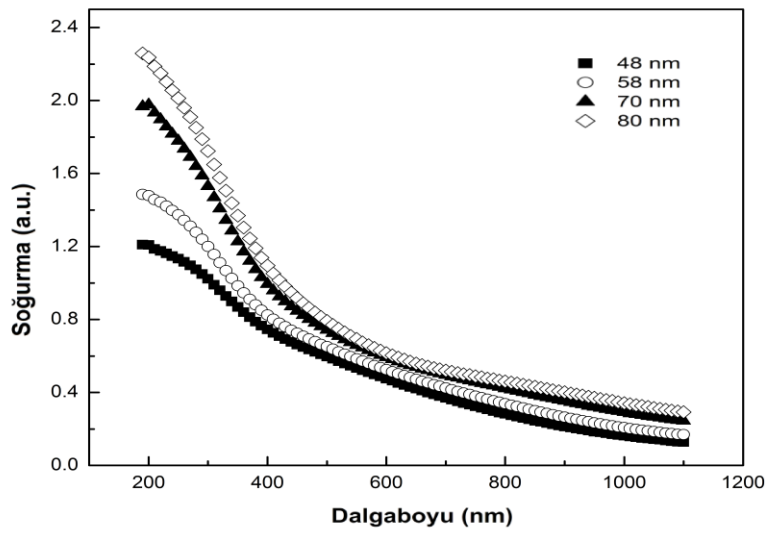
Şekil 4.11 58 nm kalınlığındaki %0,05 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri



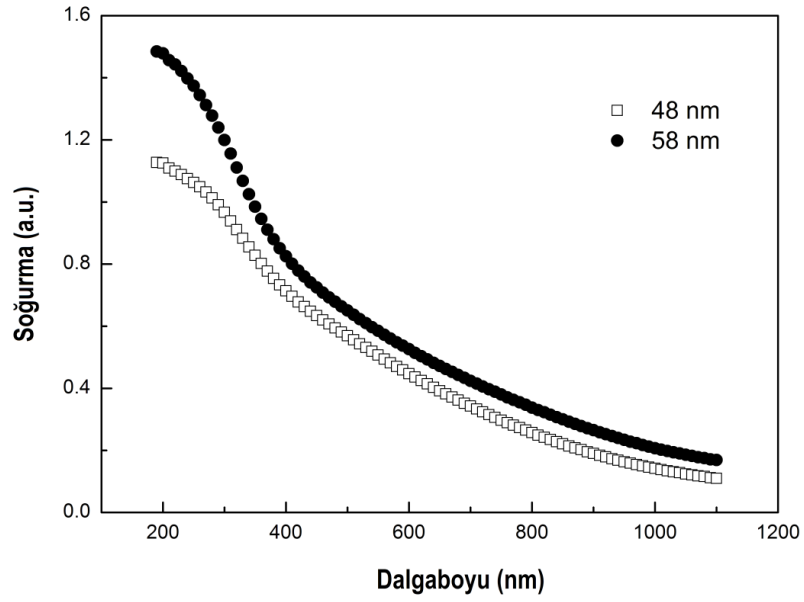
Şekil 4.12 58 nm kalınlığındaki %0,1 Ho katkılı InSe:Ho ince filminin spektroskopik elipsometre ölçümleri

#### 4.2.3 Amorf ince filmlerin çizgisel soğurma spektrumları

Amorf ince filmlerin Shimadzu UV-1800 spektrometresi ile alınan çizgisel soğurma spektrumları şekil 4.13-4.14'te gösterilmektedir.



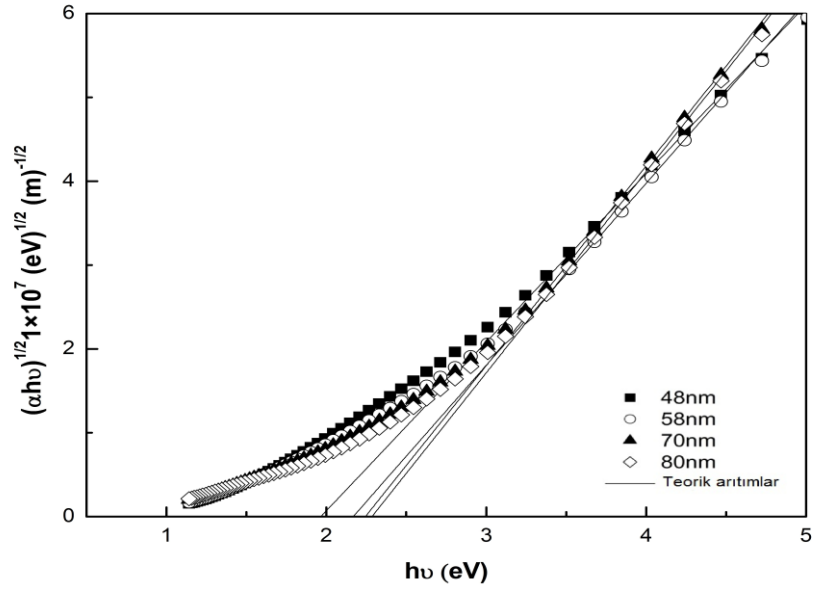
Şekil 4.13 InSe ince filmlerinin soğurma spektrumu



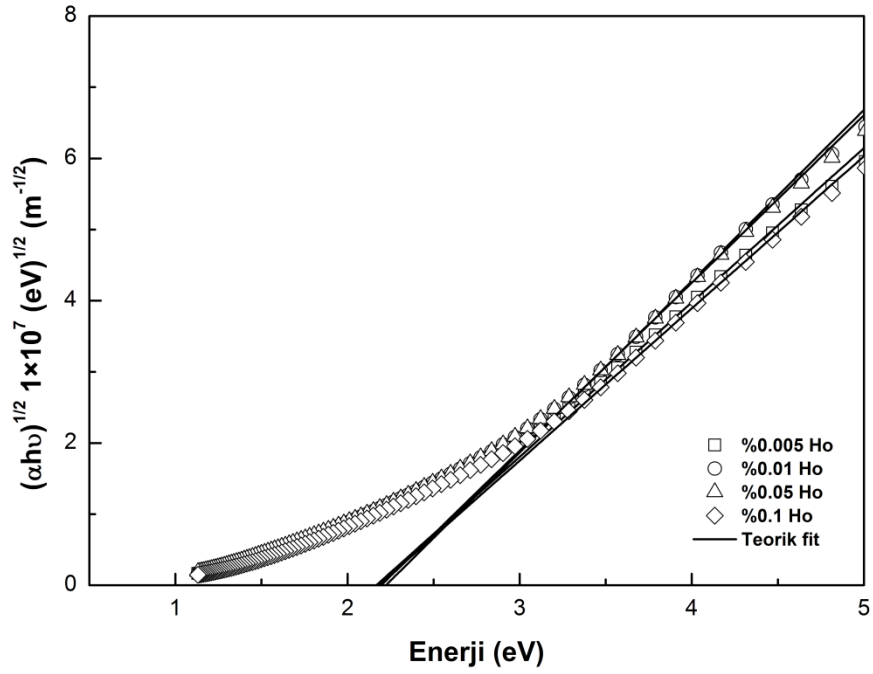
Şekil 4.14 %0.005 Ho katkılı InSe:Ho ince filmlerinin soğurma spektrumu

#### 4.2.4 Amorf ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları

Alınan çizgisel soğurma spektrumundan amorf ince filmlerin yasak enerji aralıkları belirlendi. Yasak enerji aralıkları belirlenirken yapılan arıtmalarda en iyi sonuçlar  $n=2$  değerinde görüldü. Yani amorf ince filmlerin indirekt bant geçişine sahip oldukları belirlendi. Yasak enerji bant aralıkları belirlenirken yapılan arıtmalar şekil 4.15-4.16'da verilmektedir. Amorf ince filmlerin soğurma spektrumlarının kuyrukları yasak enerji bant aralığında birçok kusur seviyelerinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu kusur seviyeleri film kalınlıklarına bağlı olarak artmaktadır.



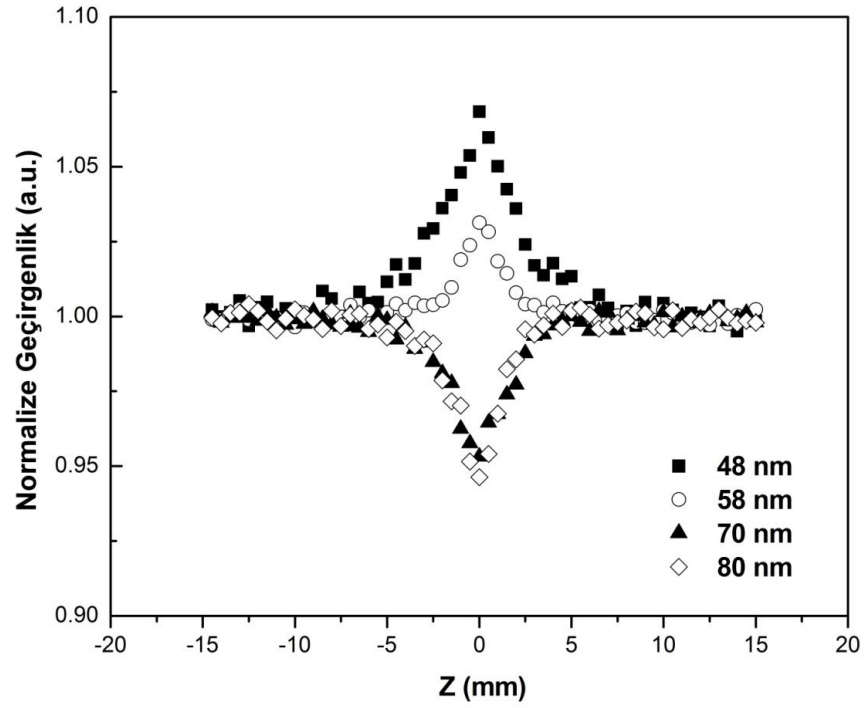
Şekil 4.15 InSe ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları



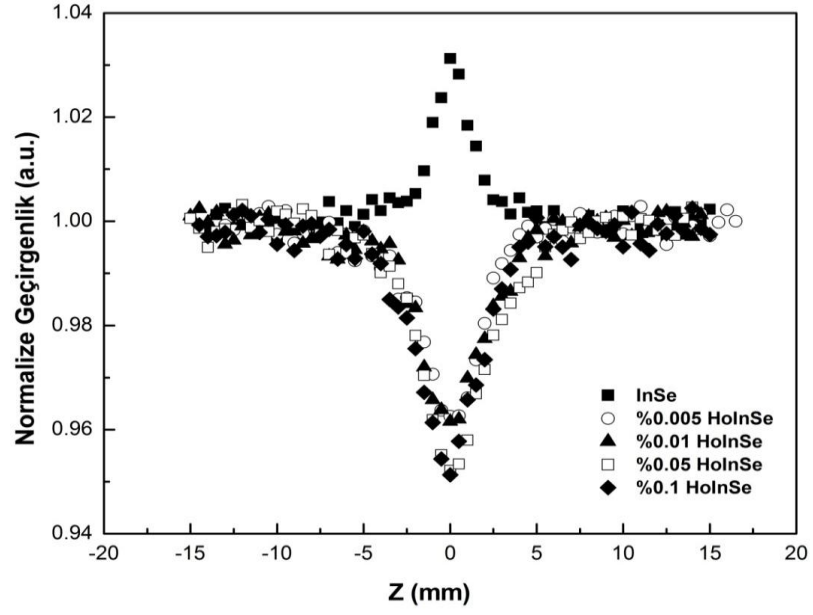
Şekil 4.16 InSe:Ho ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları

#### 4.2.5 Amorf ince filmlerin çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma özellikleri

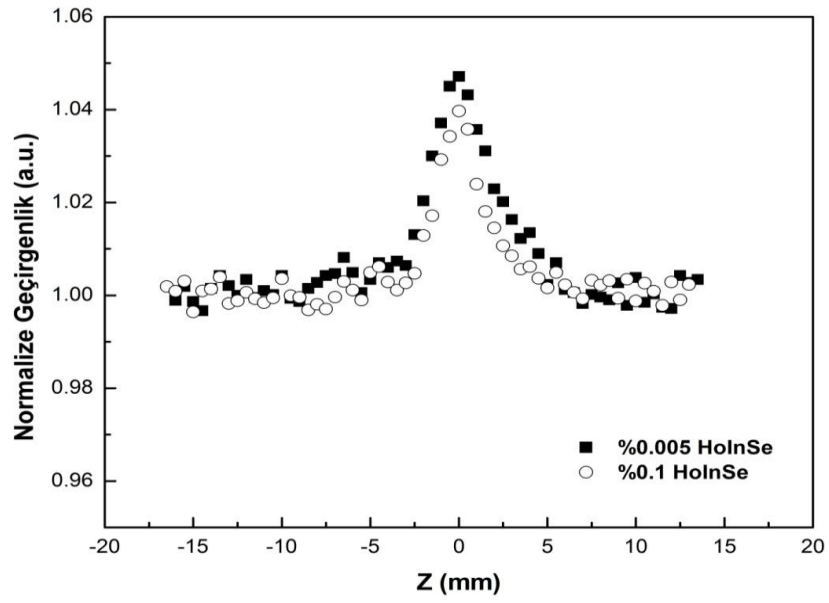
48, 58, 70 ve 80 nm kalınlıklarında InSe ve farklı katkı oranlarında Ho katkılandırılmış 48 ve 58 nm kalınlıklarında InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps atmalı lazer kaynağı kullanılarak yapılan açık yarık z-tarama deneyinden elde edilen çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma grafikleri şekil 4.17-4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.17 Farklı kalınlıklarda InSe ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği



Şekil 4.18 Farklı katkı oranlarındaki 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği



Şekil 4.19 Farklı katkı oranlarındaki 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama grafiği

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

### 5.1 Kristaller

%0.005 Ho katkılandırılmış InSe:Ho kristalinin kalınlığı 194  $\mu\text{m}$  ve %0.05 Ho katkılandırılmış InSe:Ho kristalinin kalınlığı ise 70  $\mu\text{m}$  olarak ölçüldü. Bu iki kristalin şekil 4.3'te görüldüğü gibi soğurma bandının kenarı 1020 nm dalgaboyu civarındadır. InSe:Ho kristalinin yasak enerji bant aralığı 1.22 eV' tur (Şekil 4.4). Kristallerin soğurma bandının kenarları keskin bir şekilde yükselmektedir. Bunun nedeni kristalin safsızlık veya kusur seviyeleri içermesidir. İki katkı oranındaki InSe:Ho kristallerinin 4 ns ve 65 ps atmalı lazerler kullanılarak yapılan açık yarık z-tarama deneyinden elde edilen ölçümleri şekil 4.5-4.6'da verilmiştir. Her iki lazerde de 1064 nm dalgaboylu lazer ışığı kullanılmıştır. Kullanılan lazer ışığının enerjisi 1.16 eV'a karşılık gelmektedir. Bu enerji kristallerin yasak enerji bant aralığından küçük, fakat rezonansa çok yakındır. 65 ps atmalı lazer kullanılarak yapılan ölçümlerde düşük şiddetlerde malzeme doyurulabilir soğurma gösterirken, daha yüksek şiddetlerde ise çizgisel olmayan soğurma göstermektedir. Bunun nedeni düşük şiddetlerde yasak enerji bant aralığında yer alan katkı seviyelerinin doyuma ulaşmasıdır ve bu durumda baskın olan doyurulabilir soğurma gözlenir. Fakat daha yüksek şiddetlere gidildikçe doyurulabilir soğurma olmasına rağmen, iki foton soğurması baskın hale gelir ve yüksek şiddetlerde çizgisel olmayan soğurma gözlenir. Aynı dalgaboyunda çizgisel olmayan ve doyurulabilir soğurma gösteren malzemeler optik atma daraltma işlemlerinde kullanılabilirler. Şiddete bağlı soğurmalarda soğurma katsayısı:

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \beta I \quad (5.1)$$

ile verilmektedir. Burada  $\alpha_0$  çizgisel soğurma katsayısı ve  $\beta$  çizgisel olmayan soğurma katsayısıdır. Dolayısı ile incelenen kristal içerisinden geçen ışının şiddetindeki azalma daha önce tanımlanan (2.2) denklemi ile verilir. Bu denklem uzaysal ve zamansal olarak Gaussian profiline sahip lazer atmaları için çözümlenerek örnekten geçen ışının şiddeti hesaplanır. Deneylerde örnekten geçen ışın silikon dedektörlerle algılanır. Dedektörler, üzerine gelen ışının zaman ve uzaysal olarak toplamını algıladığı için örnekten geçen

ışının şiddet ifadesinin uzay ve zaman üzerinden integrali alınarak dedektöre gelen enerji hesaplanır. Normalize geçirgenlik örnekten geçen ışının enerjisinin (dedektöre gelen enerjinin) örneğe gelen enerjiye oranı olarak tanımlanır. Bu yöntemle hesaplanan normalize geçirgenlik ifadesi (Bahae vd. 1990):

$$T(z, S=1) = \frac{1}{\sqrt{\pi}q_0(z, 0)} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left[ 1 + q_0(z, 0)e^{-\tau^2} \right] d\tau \quad (5.2)$$

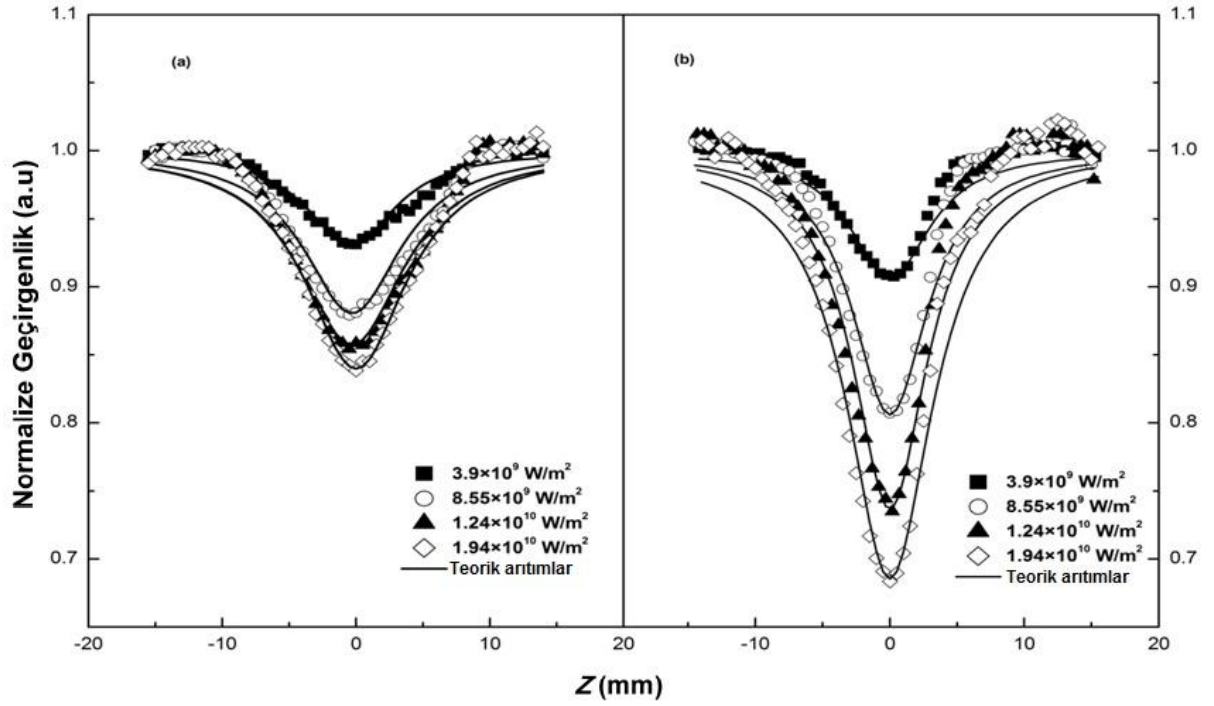
ile verilmektedir. Burada  $q_0(z, 0) = \beta I_0 L_{eff} / (1 + z^2 / z_0^2)$ ,  $z_0 = k\alpha_0^2 / 2$ ,  $I_0$  lazer ışınının odaktaki şiddeti,  $x=z/z_0$  ve  $L_{eff}$  malzemenin etkin kalınlığıdır.

Malzemenin doyurulabilir soğurma göstermesi durumunda şiddete bağlı soğurma katsayısı:

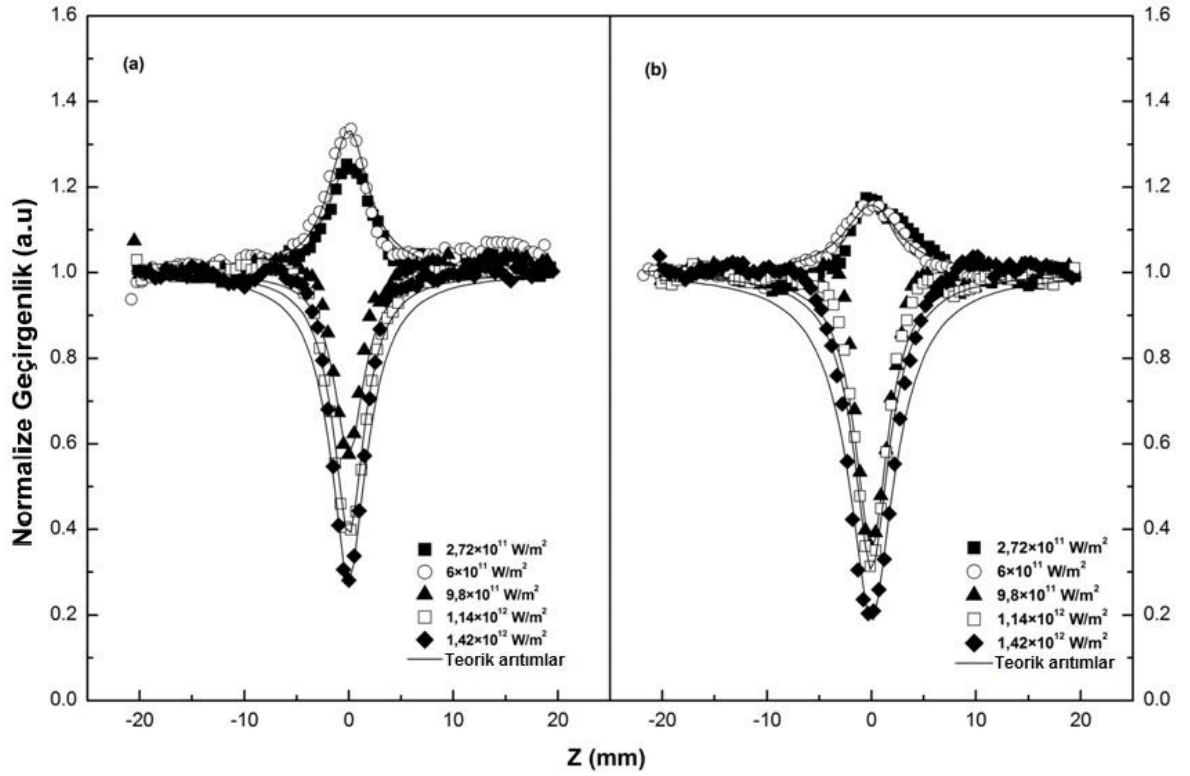
$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (5.3)$$

ile verilir ve burada  $I_s$  malzemenin doyma ulaşma eşik şiddetidir. Eğer  $I, I_s$ 'den daha küçük ise doyurulabilir soğurma şiddete bağlı çizgisel olmayan soğurma işlemi gibi göz önüne alınabilir ve  $-\frac{\alpha_0}{I_s}$ ,  $\beta$  ile eşdeğerde olur (Iripman vd. 2008). Bu durumda geçirgenlik denklemi eşitlik 5.2'de verilen denklemin eksi işaretlisi olur. InSe:Ho kristallerinin açık yarık z-tarama deney verileri arıtımı yapılırken çizgisel olmayan soğurma gösterenler denklem 5.2 ile doyurulabilir soğurma gösterenler ise denklem 5.2'nin eksi işaretlisiyle arıtıldılar. Şekil 4.5-4.6'daki deney verileri bu teoriye göre arıtılmıştır. Arıtma işlemi sonucunda deney verileri ve teorik hesaplar şekil 5.1-5.2'de gösterildiği gibi uyum içerisindedir. Yapılan ölçüm ve arıtmalar sonucu elde edilen çizgisel soğurma katsayısı, malzemenin kalınlığı, kullanılan lazer ışınının şiddeti ve o şiddetteki çizgisel olmayan soğurma katsayısı ( $\beta$ ) ve kullanılan lazer ışınının odaktaki yarıçapı çizelge 5.1-5.2'de verilmektedir. Çizelge 5.1-5.2'den de görüldüğü gibi daha

fazla katkılandırılmış kristalin aynı şiddetlerde çizgisel olmayan soğurma katsayısı daha az katkılandırılmış kristalin çizgisel olmayan soğurma katsayısından daha büyüktür. Katkı atomları arttıkça soğurma artmaktadır.



Şekil 5.1.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin nanosaniye açık yarıık z-tarama deney verilerinin arıtımı



Şekil 5.2.a. %0,005 Ho katkılı, b. %0,05 Ho katkılı InSe:Ho kristallerinin pikosaniye açık yarıık z-tarama deney verilerinin arıtımı

Çizelge 5.1 4 ns arıtım sonuçları

Malzeme	Kalınlık ( $\mu\text{m}$ )	$\alpha_0$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Şiddet ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ )	$\beta$ ( $\text{cm}/\text{W}$ )
InSe:Ho (%0,005)	~194	28	3.9	$2.6 \times 10^{-6}$
			8.5	$2.9 \times 10^{-6}$
			12.4	$3.2 \times 10^{-6}$
			19.4	$3.6 \times 10^{-6}$
InSe: Ho (%0,05)	~70	71	3.9	$3.6 \times 10^{-6}$
			8.5	$4.7 \times 10^{-6}$
			12.4	$5.5 \times 10^{-6}$
			19.4	$5.8 \times 10^{-6}$

Çizelge 5.2 65 ps artırım sonuçları

Malzeme	Kalınlık ( $\mu\text{m}$ )	$\alpha_0$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Şiddet ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ )	$\beta$ ( $\text{cm}/\text{W}$ )
InSe:Ho %0,005)	~194	28	27.2	$-2.9 \times 10^{-8}$
			60	$-5.8 \times 10^{-8}$
			98	$9.2 \times 10^{-8}$
			114	$2 \times 10^{-7}$
			142	$2.25 \times 10^{-7}$
InSe:Ho (%0,05)	~70	71	27.2	$-6.3 \times 10^{-8}$
			60	$-7.5 \times 10^{-8}$
			98	$1.25 \times 10^{-7}$
			114	$2.51 \times 10^{-7}$
			142	$5 \times 10^{-7}$

## 5.2 Amorf İnce Filmler

Amorf yarıiletken ince filmlerde yasak enerji bant aralığında safsızlık ve kusurlardan kaynaklanan birçok seviye vardır. Bu nedenle amorf ince filmlerde iki foton soğurması, tek foton soğurması, serbest taşıyıcı soğurması ve doyurulabilir soğurma çizgisel olmayan soğurmaya katkıda bulunurlar. Amorf yarıiletken ince filmlerde ışık malzeme içinde ilerlerken şiddette meydana gelen azalma:

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{\alpha I}{1 + I/I_{SAT}} - \frac{\beta I^2 + \sigma_0 \Delta N I}{1 + I^2/I_{SAT}^2} \quad (5.4)$$

ile verilir (Yüksek vd. 2010). Burada  $\alpha$  tek foton soğurma katsayısı,  $I_{SAT}$  doyurulabilir soğurma eşik şiddeti,  $\sigma_0$  serbest taşıyıcı soğurma tesir kesiti,  $\beta$  iki foton soğurma katsayısı ve  $\Delta N$  serbest taşıyıcı yoğunluğudur.

Malzemenin serbest taşıyıcılarının uyarılmış durumda kalma süreleri kullanılan lazer ışık kaynağının atma süresinden daha uzun ise üretilen serbest taşıyıcı yoğunluğu:

$$\Delta N = \frac{\alpha \tau_0}{\hbar \omega_0} I \quad (5.5)$$

iler verilir (Kamaraju vd. 2007). Bu durumda eşitlik 5.4

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{\alpha I}{1 + I/I_{SAT}} - \frac{\beta_{eff} I^2}{1 + I^2/I_{SAT}^2} = f(I) \quad (5.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\beta_{eff} = \beta + (\sigma_0 \alpha \tau_0 / \hbar \omega_0)$  etkin çizgisel olmayan soğurma katsayısıdır. Eşitlik 5.6'daki ilk terim tek fotonla doyurulabilir soğurmayı göstermektedir. İkinci terim ise hem iki foton soğurması hem de serbest taşıyıcılardan kaynaklanan doyurulabilir soğurmayı göstermektedir. Adomian ayrıştırma yöntemi (Adomian 1994) açık yarık z-tarama teorisi için doyurulabilir soğurmanın çözümü için (eşitlik 5.6'nın) bir yaklaşıklık sağlamaktadır. Eşitlik 5.6 şu şekilde integre edilebilir:

$$I_C = I_G - \int_0^L f(I) dz \quad (5.7)$$

Burada  $I_C$  malzemedan geçen şiddet,  $I_G$  malzemenin girişindeki şiddet ve  $L$  malzemenin kalınlığıdır. Adomian ayrıştırma yönteminin ilk beş mertebesi kullanılarak  $I_C$  Adomian polinomları cinsinden verilebilir. Göreli  $x = z/z_0$  konumundaki malzemenin bir fonksiyonu olarak normalize geçirgenlik:

$$T(x, L) = \frac{\int_0^\infty I_C(x, t) r dr}{e^{-\alpha_0 L} \int_0^\infty I_G r dr} \quad (5.8)$$

ile verilir. Burada  $z$  malzemenin konumu,  $z_0 = \pi\alpha_0^2/\lambda$  Rayleigh uzunluğu ve  $\lambda$  kullanılan lazerin dalgaboyudur. Atmalı lazer için açık yarık z-tarama ifadesi:

$$T(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} T(x,t)h(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h(t)dt} \quad (5.9)$$

ile verilebilir. Burada  $h(t)$  lazer atmasının zamansal profilini tanımlar ve Gaussian atmalar için  $h(t) = e^{-(t/t_0)^2}$  şeklinde verilir.

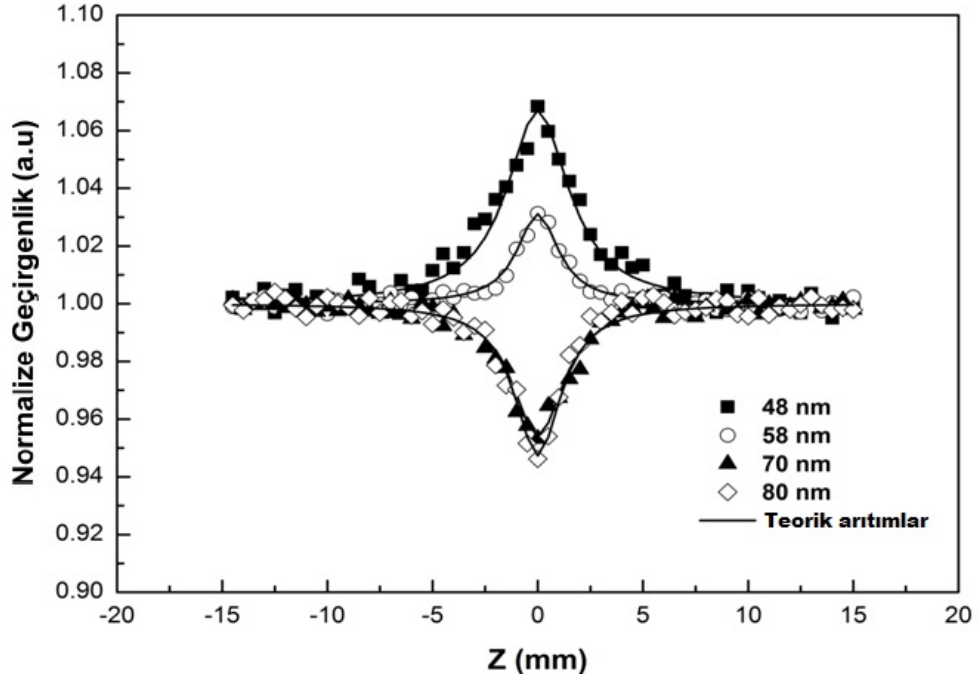
Bu denklemlerdeki  $I_C$  ifadesi Adomian polinomları cinsinden ifade edildiği için birçok terim içermektedir. Bu nedenle bu denklemlerin analitik çözümü oldukça zordur. Bu denklemler nümerik olarak araştırma grubumuz içerisinde daha önce yapılan çalışmalar kapsamında çözülmüştür. Nümerik hesaplamaların detayları bu tez kapsamının dışında olup bu tez çalışmasında bu hesaplamalar kullanılarak deney verilerinin arıtımı en küçük kareler yöntemi ile yapılmıştır.

Yukarıda anlatılan teoride kullanılan serbest taşıyıcı yoğunluğundaki yaklaşımların geçerli olması için tuzaklara yakalanan serbest taşıyıcıların bu durumda kalma sürelerinin kullanılan lazerin atma süresinden uzun olması gerekir. Tuzakların ömürlerinin ölçülmesi bu nedenle oldukça önemlidir. Bu nedenle InSe:Ho amorf ince filmlerinin tuzaklama süresini belirlemek için ultra hızlı pompa-gözlem spektroskopi deneyleri yapılmıştır. Zamana bağlı ultra hızlı spektroskopi verileri şekil 5.1'de verilmektedir. Başlangıçtaki hızlı bileşen ( $\sim 1$  ps), iletim bandının üstüne uyarılan, ısınmış taşıyıcı gazının (elektron) örgüyle etkileşerek örgü sıcaklığına soğuması süresidir. Soğurma işleminden sonra, taşıyıcılar yerleşik kusur seviyeleri tarafından tuzaklanarak veya tuzaklanmadan direk yeniden birleşerek yok olurlar. Daha yavaş ve yaklaşık birkaç yüz pikosaniye mertebesinde olan bileşen herhangi bir tuzak tarafından yakalanmadan birleşme süresidir. En yavaş bileşen (3 ns) yavaş tuzaklama ve yeniden birleşme işlemlerine atfedilebilir. Burada kusur seviyelerinin ömrü 3 ns olduğu için



aykırıdır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada amorf nanotabakaların küçülmesiyle yasak enerji bant aralığının arttığı görülmüştür (Tang vd. 2000). Bu olay kuantum hapsolme etkisine atfedilmiştir.

InSe amorf ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verileri şekil 4.17’de gösterilmiştir. Şekil 5.4’de deney verilerinin arıtımı gösterilmiştir. Şekil 5.4’ten de görüldüğü gibi deney verileri ve teorik hesaplar uyum içerisindedir. Aynı şiddette 48 ve 58 nm kalınlıklarındaki filmler doyurulabilir soğurma gösterirken 70 ve 80 nm kalınlıklarındaki filmler çizgisel olmayan soğurma göstermektedir. İnce filmler (48, 58 nm) kalın filmlere (70, 80 nm) göre daha az kusur seviyeleri içerdiği için ince filmler doyurulabilir soğurma gösterirken daha kalın filmler çizgisel olmayan soğurma gösterir. Kusur seviyelerinin ömürleri atma süresinin ömründen daha uzun ise, bu kusur seviyeleri düşük şiddetlerde de doyuma ulaşır. Ama kalın filmler daha fazla kusur seviyelerine sahip oldukları için, düşük şiddetlerde çizgisel olmayan soğurma gösterir. InSe amorf ince filmlerinin açık yarık z-tarama deneylerinden elde edilen verileri  $I_{SAT}$  ve  $\beta_{eff}$  arıtım parametresi seçilerek arıtıldılar. Arıtım işlemlerinden belirlenen değerler çizelge 5.3’te gösterilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi kalınlık arttıkça yasak enerji aralığındaki kusur seviyeleri artacağından bu kusur seviyelerini doyurmak için gerekli şiddet ve iki foton soğurma katsayısı artmaktadır.



Şekil 5.4 Farklı kalınlıklarda InSe ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verilerinin artıtımı

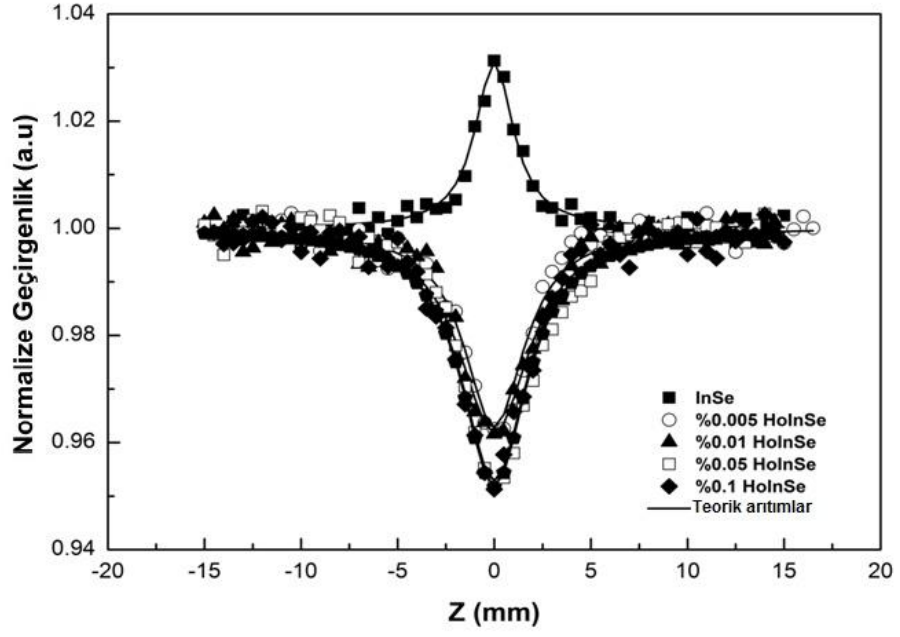
Çizelge 5.3 InSe amorf ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları

Kalınlık	$I_{\text{sat}}$ (W/m <sup>2</sup> )	$\beta_{\text{eff}}$ (m/W)
48nm	$2,5341 \times 10^{12}$	$2,2801 \times 10^{-11}$
58nm	$2,2228 \times 10^{13}$	$7,1532 \times 10^{-10}$
70nm	$5,092 \times 10^{14}$	$1,9122 \times 10^{-7}$
80nm	$5,5243 \times 10^{14}$	$2,0723 \times 10^{-7}$

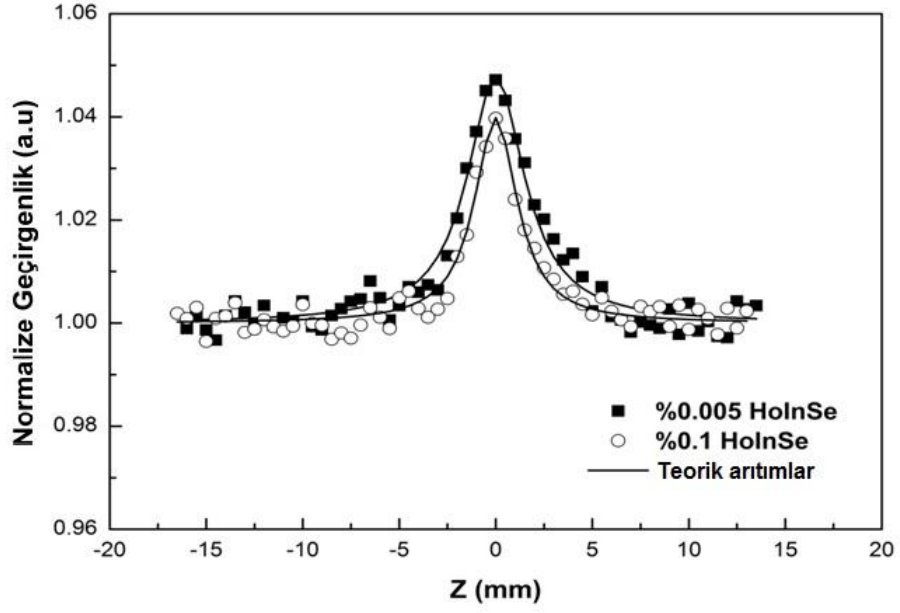
### 5.2.2 InSe:Ho amorf ince filmleri

Bu tez kapsamında çalışılan InSe:Ho ince filmlerinin alınan XRD ölçümleri sonucunda hepsinin amorf yapıda oldukları belirlenmiştir. 58nm kalınlığındaki %0.1 Ho katkılandırılmış InSe:Ho ince filminin XRD ölçüm sonucu şekil 4.7’de verilmiştir. Vakum altında ısısız buharlaştırma yöntemiyle büyütülen amorf ince filmlerin kalınlıkları spektroskopik elipsometre yardımıyla 48 ve 58 nm olarak ölçülmüştür. InSe:Ho amorf ince filmlerindeki Ho katkı oranları %0,005, %0,01, %0,05 ve %0,1’ dir. İnce filmlerin çizgisel soğurma spektrometresinden de görüldüğü gibi ince filmlerin soğurma kenarları keskin bir şekilde yükselmemektedir. Bu yasak enerji bant aralığında kusur seviyelerinin var olduğunu göstermektedir. 58 nm ince filmin yasak enerji bant aralıkları eşitlik 3.1 kullanılarak 2.17 eV olarak hesaplandı (şekil 4.16). Bu hesaplama yapılırken  $n=2$  olarak alındı. 48nm ince filmin yasak enerji bant aralığı 1.92 eV olarak hesaplandı. InSe:Ho ince filmlerinde de kalınlık arttıkça yasak enerji bant aralığı artmaktadır. Bu da daha önce bahsedildiği gibi kuantum hapsolme etkisinden kaynaklanmaktadır.

Pikosaniye açık yarık z-tarama deneylerinden elde edilen grafikler şekil 4.18-4.19’da gösterilmiştir. Şekil 5.5-5.6’da bu deney verilerinin artımları gösterilmiştir. Şekil 5.5-5.6’da da görüldüğü gibi deney verileri ve teorik hesaplamalar uyum içerisindedir. 48 nm kalınlığındaki bütün katkı oranlarında malzeme doyurulabilir soğurma göstermektedir. 58 nm kalınlığındaki bütün katkı oranlarında ise malzeme çizgisel olmayan soğurma göstermektedir. Aynı şiddette 58 nm kalınlığındaki InSe amorf ince filmlerinde doyurulabilir soğurma gözlenirken InSe:Ho ince filmlerinde katkı seviyelerinin artmasından dolayı çizgisel olmayan soğurma gözlenmektedir. Pikosaniye açık yarık z-tarama deneylerinden elde edilen veriler artırılarak elde edilen değerler çizelge 5.4-5.5’te gösterilmektedir. Çizelgelerden de görüldüğü gibi kalınlık ve katkı oranı arttıkça  $I_{SAT}$  ve  $\beta_{eff}$  artmaktadır. Bunun nedeni de kalınlık ve katkı oranı arttıkça yasak enerji bant aralığındaki katkı ve kusur seviyelerinin artmasıdır.



Şekil 5.5 Farklı katkı oranlarındaki 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı



Şekil 5.6 Farklı katkı oranlarındaki 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama deney verilerinin arıtımı

Çizelge 5.4 58 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları

Katkı Oranı	$I_{\text{sat}}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\beta_{\text{eff}}$ ( $\text{m}/\text{W}$ )
%0,005	$4,9976 \times 10^{14}$	$2,3677 \times 10^{-7}$
%0,01	$5,0387 \times 10^{14}$	$3,0032 \times 10^{-7}$
%0,05	$5,7541 \times 10^{14}$	$3,4326 \times 10^{-7}$
%0,1	$6,999 \times 10^{14}$	$3,4543 \times 10^{-7}$

Çizelge 5.5 48 nm InSe:Ho ince filmlerinin 65 ps açık yarık z-tarama sonuçları

<b>Katkı Oranı</b>	<b><math>I_{\text{sat}}</math> (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\beta_{\text{eff}}</math> (m/W)</b>
%0,005	$3,2615 \times 10^{12}$	$4,0938 \times 10^{-10}$
%0,01	$5,1273 \times 10^{12}$	$2,1885 \times 10^{-9}$
%0,05	$8,6776 \times 10^{12}$	$6,0068 \times 10^{-9}$
%0,1	$1,0583 \times 10^{13}$	$1,0904 \times 10^{-7}$

InSe ve InSe:Ho amorf ince filmlerinin açık yarık z-tarama deney sonuçlarından yararlanarak amorf ince filmlerin doyuma ulaşma eşik şiddetinin, doyurulabilir soğurma ve çizgisel olmayan soğurma davranışlarının kontrollü bir şekilde katkılanırılarak veya film kalınlıkları değiştirilerek ve böylece kusur seviyelerinin sayısı değiştirilerek kontrol edilebileceği belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Adduci, F. Catalano, I. M., Cingolani, A. and Minafra, A. 1977. Direct and Indirect Two- Photon Process in Layered Semiconductors. *Phys. Rev. B*, vol. 15, pp. 926-931.
- Adomian, G. 1994. *Solving Frontier Problems of Physics: The decomposition Method*. Kluwer, Dordrecht.
- Ando, G., Kdono, K., Hatura, M., Sakaguchi, T. and Miya, M. 1995. Large Third Order Optical Nonlinearities in Transition- Metal Oxides, *Nature*, vol. 374, pp. 625-627.
- Ateş, A. 2002. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ateş, A., Yıldırım, M. and Gurbulak, B. 2006. Absorption Measurement and Urbach's Rule in InSe and InSe: Ho<sub>0.0025</sub>, InSe: Ho<sub>0.025</sub> Single Crystals. *Opt. Mater.* vol. 28, pp. 488-493.
- Ateş, A., Kundakçı, M., Astam, A. and Yıldırım, M. 2008. Annealing and Light Effect on Optixal and Electrical Properties of Evaporated Indium Selenide Thin Films. *Physica E (Amsterdam)* vol. 40, pp. 2709-2713.
- Bahae, M. S., Said, A. A., Wei, T. H., Hagan, D. J. and Stryland, E. W. V. 1990. Sensitive Measurement of Optical Nonlinearities Using a Single Beam. *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 760-769.
- Band, Y. B., Harter, D. J. and Bavli, R. 1986. Optical Pulse Compressor Composed of Saturable and Reverse Saturable Absorbers. *Chem. Phys. Lett.*, vol. 126, pp. 280-284.
- Bass, M., Franken, P. A., Ward, J. F. and Weinreich, G. 1962. Optical Rectification. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 9, pp. 446-448.
- Blasi, C. De., Micocci, G., Mongelli, S. and Tepore, A. 1982. Large Inse Single Crystals Grown from Stoichiometric and Non- stoichiometric Melts. *J. of Cryst. Growth*, vol. 57, pp. 482-486.
- Boyd, R. W. 1992. *Nonlinear Optics*. Academic Press.
- Catalano, I. M., Cingolani, A., Cali, C. and Riva-Sanseverino, s. 1979. Second Harmonic Generation in InSe Solid State Commun., vol. 30, pp. 585-588.

- 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.
- Grasso, V. 1986. *Electronic Structure and Electronic Transition in Layered Material*. Reidel: Dordrech.
- Gu, B., Fan, Y. X., Wang, J., Chen, J., Ding, J.P., Wang, H.T. and Guo, B. 2006. Characterization of Saturable Absorbers Using an Open- Aperture Gaussian-Beam Z- Scan. *Phys. Rev. A*, vol. 73, pp. 065803-065806.
- Gürbulak, B., Yıldırım, M., Abay, B., Tüzemen, B., Alieva, M. 1998. Growth and Optical Properties of Ho Doped n-Type Indium Selenide. *Phys. Stat. Sol. A*, vol. 168, pp. 495-500.
- Gürbulak, B. 2004. Urbach Tail and Optical Investigations Of Gd Doped and Undoped InSe Single Crystals. *Physica Scripta.*, vol. 70, pp. 197-201.
- Iripman, L., Deepthy, A., Krishnan, B., Nampoori, V. P. N. and Radhakrishnan, P. 2008. Nonlinear Optical Characteristics Of Self-Assembled Films of ZnO. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, vol. 90, pp. 547-556.
- Kamaraju, N., Kumar, S., Sood, A. K., Guha, S., Krishnamurthy, S. and Rao, C. N. R. 2007. Large Nonlinear Absorption and Refraction Coefficients of Carbon Nanotubes Estimated from Femtosecond Z-scan Measurements. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, pp. 251103-251105.
- Katerynchuk, V. M., Kovalyuk, M.Z., Tovarnitskii M.V. 2006. Photoemission Spectra of Indium Selenide. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 9, pp. 36-39.
- Kokh, K. A., Nenashev, B. G., Kokh, A. E. and Shvedenkov, G. Yu. 2005. Application of a Rotating Heat Field in Bridgman-Stockbarger Crystal Growth *J. Cryst. Growth.*, vol. 275, pp. e2129-e2134.
- Kundakçı, M., Gürbulak, B., Doğan, S., Ateş, A., Yıldırım, M. 2008. Urbach Tail and Electric Field Influence On Optical Properties of InSe and InSe:Er Single Crystals. *Appl. Phys. A*, vol. 90, pp. 479-485.
- 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 in Amorphous GaSe Thin Films. *Journal of Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 063102

- McCanny, J. V. and Murray, R. B. 1977. The Band Structure of Gallium and Indium Selenide. *J. Phys. C*, vol. 10, pp. 1211-1222.
- Mooser, E. and Pearson, W. B. 1956. The Chemical Bond in Semiconductors- The Group V-B to VII-B Elements and Compounds Formed Between Them. *Canadian J. of Phys.*, vol. 34, pp. 1369-1376.
- Neihuhr, K. E. 1963. Generation of Laser Axial Mode Difference Frequencies in a Nonlinear Dielectric. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 2, pp. 136-137
- Sari, H. 2008. Optoelektronik ders notları. Web sitesi: <http://www.huseyinsari.net.tr>  
Erişim tarihi: 07/03/2011
- Schubert, K., Dörre E., and Günzel, E., (1954), *Naturwissenschaften* 41, 448.
- Segura, A., Bouvier, J., Andres, M. V., Manjon, F. J. and Munoz, V. 1997. Strong Optical Nonlinearities in Gallium and Indium Selenides Related to Inter-Valance Band Transitions Induced by Light Pulses. *Phys. Rev. B.*, vol. 56, pp. 4075-4084.
- Shen, Y. R. 1984. *The Principles of Nonlinear Optics*, John Wiley, New York.
- Smektala, F., Quemard, C., Leneindre, L., Lucas, J., Barthelemy, A. and De Angelis, C. 1998. Chalcogenide Glasses with Large Nonlinear Refractive Indices. *J. Non-Cryst. Sol.*, vol. 239, pp. 139-142.
- Smith, A. W. and Braslou, N. 1963. Observation of an Optical Difference Frequency. *J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 2105-2106.
- Sugaike, S. 1957, *Mineralog. J.* 2, 63.
- Sutherland, R. L., McLean D. G. and Kirkpatrick, S. 2003. *Handbook of Nonlinear Optics*. Marcel Dekker Press
- Tang, X. G., Zeng, H. R., Ding, A. L., Qui, P. S., Luo, W. G., Liu, H. Q. and Mo, D. 2000. Microstructure and Optical Properties of Amorphous and Crystalline PbZrO<sub>3</sub> Thin Films Grown on Si(100) Substrates by a Sol-Gel Process. *Solid State Commun.*, vol. 116, pp. 507-511.
- Tagiyev, B. G., Niftiyev, G. M. and Alidayev, F. S., 1985. Photoluminescence and Photoconductivity of Indium Selenide Single Crystal Doped With Rare-Earth Elements. *Sol. Stat. Commun.*, vol. 53, pp. 877-879.
- Urbach, F. 1953. The Long Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids. *Phys. Rev.*, vol. 92, pp. 1324-1324.

- Van Stryland, E. W., Woodall, M. A. i Vanherzeele, H. and Soileau, M. J. 1985. Energy Band-Gap Dependence of Two-Photon Absorption. *Opt. Lett.*, vol. 10, pp. 490-492.
- Wang, J., Bahae, M. S., Said, A. A., Hagan, G. J. and Van Stryland, E. W. 1994. Time Resolved Z-scan Measurement of Optical Nonlinearities. *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, pp. 1009-1017.
- Yüksek, M., Elmali, A., Karabulu, M. and Mamedov, G. M. 2009. Switching from Negative to Positive Nonlinear Absorption in p-Type 0.5 at % Sn Doped GaSe Semiconductor Crystal. *Opt. Mater.*, vol. 31, pp. 1663-1666.
- Yüksek, M., Elmali, A., Karabulu, M. and Mamedov, G. M. 2010. Nonlinear Absorption in Undoped and Ge Doped Layered GaSe Semiconductor Crystals. *Appl. Phys. B Lasers and Opt.*, vol. 98, pp. 77-81.
- Yüksek, M., Kürüm, U., Yaglioglu, H. G., Elmali, A. and Ateş, A. 2010. Nonlinear and Saturable Absorption Characteristics of Amorphous InSe Thin Films. *J. Appl. Phys.*, vol. 107, pp. 033115-033120.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erbil Murat AYDIN

Doğum Yeri : ANKARA

Doğum Tarihi : 16.03.1985

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : İncesu Anadolu Lisesi (1999 - 2003)

Lisans : Ankara Üniversitesi Müh. Fak. Fizik Müh. Böl. (2004 - 2009)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği

Anabilim Dalı (Eylül 2009 – Haziran 2011)