

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**InSe, InTe ve InTe:Er YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN DOĞRUSAL
OLMAYAN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ecrin AVCI

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

InSe, InTe ve InTe:Er YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN DOĞRUSAL OLMAYAN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ecrin AVCI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Ahmet KARATAY

Tez çalışmasında, InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken kristallerinden üretilen farklı kalınlıklardaki ince filmlerin doğrusal olmayan soğurma özellikleri deneysel yöntem ve teorik model ile araştırılmıştır. Isısal buharlaştırma sistemi ile vakum ortamında üretilen ince filmler farklı kalınlıklarda üretilmiş ve film kalınlıkları spektroskopik elipsometre kullanılarak 30 nm, 60 nm ve 90 nm olarak ölçülmüştür. Doğrusal soğurma deneyleri sonucu doğrusal soğurma spektrumu elde edilmiş ve enerji bant değerleri ve Urbach enerjileri doğrusal soğurma spektrum verileri yardımı ile hesaplanmıştır. Kalınlık ve katkılamadaki değişim sonucu yasak enerji bant değerlerinde 0.08 eV kadar küçük değişimler gözlenirken, Urbach enerjilerinde yaklaşık 0.57 eV gibi önemli artışlar gözlenmiştir. Z-tarama deneyleri esnasında ns atmalı lazer kullanılmış ve teorik model ile deneysel veriler kullanılarak doğrusal olmayan soğurma ve doyurulabilir soğurma katsayıları belirlenmiştir. Açık yarık Z-tarama verilerinde geçirgenliği elde etmek için tek foton soğurması, iki foton soğurulması, uyarılmış durum soğurması ve doyurulabilir soğurmayı içeren teorik model kullanılmıştır. Örneklerin doğrusal olmayan soğurma performansı belirlenmiştir. En büyük etkin doğrusal olmayan soğurma katsayısı (β_{eff}) 90 nm InTe:Er örneği için 1.00×10^4 cm/MW ve en düşük doyum soğurma katsayısı (I_{sat}) 30 nm InSe örneği için 5.00×10^3 MW/cm² olarak hesaplanmıştır. Modelden yararlanılarak doğrusal olmayan soğurma katsayısı ve doyma şiddeti eşliği değerleri elde edildi ve uyarılmış durum soğurması ile doyurulabilir soğurma arasındaki etkileşim, amorf yarıiletkenlerin doğrusal olmayan soğurma davranışına kusur durumlarının katkısını içeren bir enerji bant diyagramı ile açıklanmıştır.

Mart 2022, 37 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan soğurma, Z-tarama, Amorf yarıiletken, Kusur seviyeleri, Yarıiletken İnce Film

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF InSe, InTe ve InTe:Er SEMICONDUCTORS

Ecrin AVCI

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

Supervisor : Doç. Dr. Ahmet KARATAY

In this thesis, nonlinear optical absorption properties of thin films of different thicknesses produced from InSe, InTe and InTe:Er semiconductor crystals were investigated by experimental and theoretical model. Thin films produced in vacuum environment with thermal evaporation system were produced in different thicknesses and film thicknesses were measured as 30 nm, 60 nm and 90 nm by using a spectroscopic ellipsometer. The energy band values and Urbach energies obtained from the linear absorption spectrum data which produced by the linear absorption experiments. While the change in thickness and doping brought about small changes in band gap energies such as 0.08 eV, about 0.57 eV increases were obtained in Urbach energies of thicker and doped films. Z-scan experiments of thin films were carried out using nanosecond pulsed laser and nonlinear and saturation absorptions were investigated both experimentally and theoretically. The theoretical model including single photon absorption, two photon absorption, excited state absorption and saturable absorption was used to obtain the transmittance in the open slit Z-scan data. The nonlinear optical absorption properties of the samples were determined. While the maximum nonlinear absorption coefficient (β_{eff}) was calculated as 1.00×10^4 cm/MW for the 90 nm InTe:Er sample, the minimum saturation intensity threshold (I_{sat}) was calculated as 5.00×10^3 MW/cm² for the 30 nm InSe sample. With the help of the model, nonlinear absorption coefficient and saturation threshold values were obtained, and the interaction between excited state absorption and saturable absorption is explained by suggesting an energy band diagram that includes the contribution of defect states to the nonlinear absorption behavior of amorphous semiconductors.

Marc 2022, 37 page

Key Words : Nonlinear absorption, Thin film, Z-scan, Amorphous semiconductor, Defect states, Semiconductor Thin Films

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yanımda olan öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet Karatay’a, çalışmamın yürütülmesi konusunda gösterdiği büyük destek, özveri ve geri dönüşleri ile her zaman yanımda olan Sayın Arş. Gör. Bekir Asilcan Ünlü’ye, Optik Malzemeler Araştırma Grubu bünyesindeki değerli hocalarım ve arkadaşlarıma, tezin değerlendirme ve savunma aşamasındaki değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Elif Orhan’a ve Prof. Dr. Ayhan Elmalı, tüm öğrencilik hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans sürecimde de destekleri ile beni asla yalnız bırakmayan çok sevdiğim aileme ve bu süreçte tüm kalbiyle beni yalnız bırakmayan ve birbirimizin başarılarına şahit olmaya devam etmek istediğim sevgili Gürhan Aytaç Tamer’e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ecrin AVCI
Ankara, Mart 2022

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.....	4
2.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Soğurma	4
2.1.1 Doğrusal soğurma	4
2.1.2 Doğrusal olmayan soğurma.....	5
2.1.2.1 İki foton soğurması	5
2.1.2.2 Serbest taşıyıcı soğurması	6
2.1.2.3 Uyarılmış durum soğurması.....	6
2.1.2.4 Doyurulabilir soğurma	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	9
3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma	9
3.1.1 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletkenlerin ince filmlerinin üretilmesi	10
3.2 Spektroskopik Elipsometre	11
3.3 InSe, InTe ve InTe:Er Yarıiletken İnce Filmlerinin Doğrusal Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji Bant Aralıklarının Belirlenmesi	12
3.4 Urbach Enerji Değerlerinin Belirlenmesi	14
3.5 Z-tarama Tekniği	15
3.5.1 Açık yarık Z-tarama tekniği	15
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	18
4.1 InSe, InTe ve InTe:Er Yarıiletken İnce Filmlerinin Ölçüm Sonuçları.....	18
4.1.1 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları	18
4.1.2 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları	20
4.1.3 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin Urbach enerjileri.....	22
4.1.4 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin kalınlık ölçümleri	25

4.1.5 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma özellikleri.....	27
5. SONUÇ.....	32
KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ.....	37



SİMGELER DİZİNİ

B	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 ışın 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 Malzemeye gelen ışığın doğrusal soğurmasının şematik gösterimi	4
Şekil 2. 2 (a) Kendiliğinden ve (b) Ultra-hızlı pompa-gözlem spektroskopisi ile iki foton soğurması şematik gösterimi	6
Şekil 2.3 Uyarılmış durum soğurması şematik gösterimi.	7
Şekil 3.1 Vakum altında ısısal buharlaştırma yoluyla ince film kaplama sistemi şematik gösterimi.	9
Şekil 3.2 Vaksis model ısısal buharlaştırma sistemi.	10
Şekil 3.3 Isısal buharlaştırma sistemiyle erimiş silika alttaş üzerinde üretilen ince filmler	11
Şekil 3.4 J.A Woolaam M2000V marka Spektroskopik Elipsometri cihazı.....	12
Şekil 3.5 Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi	14
Şekil 3.6 Doğrusal olmayan soğurma eğrisi	16
Şekil 3.7 Doyurulabilir soğurma grafiği	16
Şekil 3.8 Açık yarık Z-tarama deney düzeneğinin şematik gösterimi.	17
Şekil 4.1 Aynı kalınlıktaki 30 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları	18
Şekil 4.2 Aynı kalınlıktaki 60 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları	19
Şekil 4.3 Aynı kalınlıktaki 90 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları	19
Şekil 4.4 30 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları	21
Şekil 4.5 60 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları	21
Şekil 4.6 90 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları	22
Şekil 4.7 30 nm InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha'$ ya karşılık hv grafiği.....	23
Şekil 4.8 60 nm InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha'$ ya karşılık hv grafiği.....	24
Şekil 4.9 90 nm InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha'$ ya karşılık hv grafiği.....	24
Şekil 4.10 90 nm InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha'$ ya karşılık hv grafiği.....	25
Şekil 4.11 60 nm InSe amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri	26
Şekil 4.12 60 nm InTe amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri	26
Şekil 4.13 60 nm InTe:Er amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri	27
Şekil 4.14 30 nm kalınlıkta InSe yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği.....	28

Şekil 4.15 30 nm kalınlıkta InTe yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği.....	28
Şekil 4.16 30 nm kalınlıkta InTe:Er yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği.....	29



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 InSe, InTe ve InTe: Er ince filmlerinin Eg değerleri	20
Çizelge 4.2 InSe, InTe ve InTe: Er ince filmlerinin Eu değerleri	23
Çizelge 4.3 InSe, InTe ve InTe: Er nanosaniye Z-tarama deneyleri ile elde edilen Isat ve βeff değerleri.....	29



1. GİRİŞ

Optik, ışığın incelenmesinden ve onunla ilişkili olaylardan sorumlu olan fiziğin bir alt dalıdır. Ayna, mercek, teleskop, lazer, fiber optik, optik sensörler ve optik anahtarlamalar gibi uygulama alanları sayesinde günlük hayatımızda ve teknolojide optik biliminden yararlanılır. Kullanılan ışık kaynağının yoğunluğuna göre doğrusal ve doğrusal olmayan optik olarak ikiye ayrılır. Düşük şiddetli ışık kullanılarak malzemenin yansıma, kırılma gibi optiksel davranışlarını inceleyen doğrusal optikte, kaynak değişmedikçe frekans değişmez. Yüksek şiddetli ışık kullanılarak ışık-madde etkileşimi sonucu ortaya çıkan soğurma, kırılma indisi, yansıma katsayısı gibi optiksel davranışları inceleyen doğrusal olmayan optikte ise frekans değişebilir. Yani ışığın doğrusal ya da doğrusal olmayan davranışı, ışığın hareket ettiği ortamın bir özelliğidir. Doğrusal olmayan optik, lazerin icadından beri önemli olan bir alandır ve ışığın doğasını anlamamızı sağlar. 1960 yılında Maiman tarafından yakut lazerinin keşfi ve 1961 yılında Franken ve çalışma arkadaşları tarafından keşfedilen ikinci harmonik üretimi doğrusal olmayan optiğin ortaya çıkmasına ışık tutan iki önemli olay olarak görülmektedir (Boyd, 1992). Doğrusal olmayan optiğin uygulama alanlarından olan doğrusal olmayan soğurma, yüksek ışık şiddetlerindeki ışığın madde ile etkileşimini inceler ve şiddetin fonksiyonu olarak malzemenin geçirgenliğindeki değişiklik olarak tanımlanır. Optik sınırlama, Q-anahtarlama ve mod kilitleme gibi uygulama alanlarından dolayı doğrusal olmayan soğurma oldukça önemlidir (Kürüm vd. 2010).

Bilimsel araştırmalar ve çeşitli yüksek teknoloji ürünler için tercih edilen yarıiletken grubu malzemelerinin de içinde bulunduğu optik malzemeler, fotonik ve optik uygulamaların teknolojik evriminde giderek daha önemli bir hal almaktadır. Çok iyi doğrusal olmayan özelliklere sahip olup, normal şartlar altında yalıtkan olan ancak ısı, ışık, manyetik alan veya elektriksel akım-gerilim uygulandığında iletken özellik gösteren yarıiletken malzemeler, elektronik endüstrisinin temelini oluşturur ve opto-elektronik teknolojisi için de oldukça önemli bir yere sahiptir (Sze, 1981). Buna ek olarak, doğrusal olmayan optik malzemeler optik sinyal işleme, ultra hızlı anahtarlar, ultra kısa darbeleri lazerler, sensörler, lazer amplifikatörler gibi birçok optik uygulamada önemli rol oynar. Optik anahtarlama gibi önemli uygulama alanları nedeniyle

yariletken malzemelerin doyurulabilir soğurma (saturable absorption) ve doğrusal olmayan (nonlinear) özellikleri son yıllarda büyük önem kazanmıştır (Kürüm vd. 2010).

Yarıiletkenler için doğrusal olmayan soğurma kullanılan lazer ışık kaynağının atma başına enerjisi ile incelenen yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı ile ilişkilidir. Kusur seviyesi veya katkılandırma işlemi yapılmamış yarıiletkenler için doğrusal olmayan soğurma koşulu, atma başına düşen lazer ışık kaynağı enerjisinin yasak enerji bant aralığının tamamından küçük veya yarısından büyük ($\frac{E_g}{2} < \hbar\omega < E_g$) olduğu durumlar ile ifade edilir (Vodopyanov vd. 1998). Yasak enerji bant aralığının ışık enerjisinden küçük olduğu zaman $E_g < \hbar\omega$ rezonans durumu olurken, ışık enerjisinin bant aralığına eşit olduğu durumda $E_g = \hbar\omega$ doyurulabilir soğurma gözlenebilmektedir.

Kristal yapıdaki ince filmlerin aksine amorf yarıiletkenler, yapısında tekrarlanan periyodikliğin olmaması ile tanımlanır. Amorf yarıiletkenlerde uzun menzilli düzen olmaması farklı bağ uzunlukları, farklı bağ açıları, koordineli olmayan ve aşırı koordineli atomlar gibi özel kusurların ürünleri olan amorf katılara özgü ilginç özellikler gözlenebilmektedir. Bu kusurlar elektronik bant yapısını değiştirir ve elektronların işgal edebileceği amorf katıların bant aralığı içinde kusur durumları olarak adlandırılan enerji seviyelerini ortaya çıkarmaktadır (Yüksek vd. 2010). Kusur durumlarını anlamak ve kontrol edebilmek çok önemlidir, çünkü son çalışmalar doğrusal olmayan soğurma (NLA) özelliklerinin, ince filmlerin kalınlığının değiştirilmesi veya doping yoluyla kusur durumlarının yoğunluğunun değiştirilmesiyle, doğrusal olmayan soğurma davranışının doyurulabilir soğurmada (SA) ters doyurulabilir soğurmaya (RSA) dönüşebilecek şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir (Ertap vd. 2019, Zhang vd. 2017).

Tabakalı InSe yarıiletkeni sahip olduğu optik ve elektronik özelliklerinden dolayı ışık-madde etkileşimi diğer iki boyutlu maddelerle kıyaslandığında oldukça dikkat çekmektedir ve güneş pili gibi birçok farklı uygulamalar için tercih edilmektedir (Yang vd. 2019). Doğrusal olmayan optik çalışmalar için külçe halinde InSe kristali Catalano tarafından ilk kez 1979 yılında incelenmiş ve 1997’de ise doğrusal olmayan soğurma

davranışı Segura tarafından çalışılmıştır (Karatay, 2011). InTe periyodik tablodaki kalkojen grubu olan VI. Grup elementlerinden Te ile III. Grupta bulunan In elementinin oluşturduğu kalkojenit bir bileşiktir. Kalkojenit bileşiklerin doğrusal olmayan optik özellikleri çok güçlü olduğu için kalkojenitler optik anahtarlama gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Zakery, 2007). Kristal içerisine atom katkılandırma işlemi yasak enerji bant aralığında kusur seviyeleri oluşturur. Kusur seviyelerinin kontrol edilmesiyle birlikte örneklerin doğrusal olmayan soğurma mekanizmaları güçlendirilebilir. InTe:Er yarıiletkeninin Er katkılanmasına benzer olarak farklı yarıiletkenlerin katkılanmaya bağlı olarak oluşan kusur seviyelerinin, doğrusal olmayan soğurma özellikleri üzerinde çok önemli etkilerinin olduğu literatürde görülmektedir (Kürüm vd. 2010).

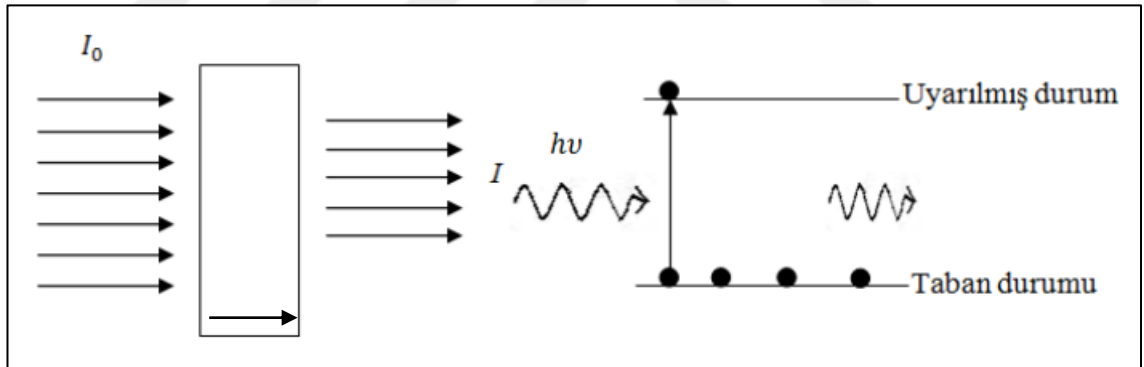
Bu tez çalışması farklı kalınlıklarda elde edilen InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletkenlerinin doğrusal olmayan optik özelliklerinin araştırılmasını kapsamaktadır. İlk olarak külçe (bulk) halde bulunan yarıiletken kristallerinden oluşan örnekler belirlenen ağırlıklarda hazırlanıp ısısal buharlaşma yöntemiyle ince film haline getirilmiştir. İnce filmlerin üretilmesinden sonra kalınlık ölçümlerinin yapılması için spektroskopik elipsometre kullanılmış ve ardından UV-VIS spektrometresi ile doğrusal soğurma ölçümleri yapılmıştır. Son olarak 1064 nm dalgaboylu, 4 nanosaniye (ns) atmalı, 10 Hz frekanslı lazer ışın kaynağı kullanılarak Z-tarama tekniği ile örneklerin doğrusal olmayan optik özelliklerini incelemek için ölçümler yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Soğurma

2.1.1 Doğrusal soğurma

Belirli bir geçirgenlikte olan malzeme üzerine düşürülen ışık malzemenin elektronlarını temel seviyeden herhangi bir uyarılmış seviyeye çıkarabilecek enerjiye sahip ise ışığın bir kısmı malzeme tarafından soğrulur ve kalan kısmı geçirilir. Işığın malzeme tarafından bu şekilde soğurulması olayı doğrusal soğurma olarak tanımlanmaktadır. Yarıiletken malzemelerin bant yapıları direkt (doğrudan) ve indirekt (dolaylı) bant olmak üzere iki grupta incelenir. Yarıiletken malzemelerde doğrusal soğurma meydana gelmesi için foton enerjisinin bant aralığının üstünde olması gerekir ve bu durum indirekt bant aralığına sahip yarıiletkenlerde gözlenebilmektedir.



Şekil 2.1 Malzemeye gelen ışığın doğrusal soğurmasının şematik gösterimi

I_0 şiddetli ışık x kalınlığındaki malzeme üzerine düşürüldüğü zaman malzeme tarafından doğrusal olarak soğrulur ve malzemeden çıktığında şiddeti I olur (Şekil 2.1). Burada $I < I_0$ 'dır ve $h\nu$ fotonun enerjidir. I_0 düşük şiddetli olduğu için sadece doğrusal soğurma gerçekleşir çünkü doğrusal olmayan soğurmalar için çok yüksek şiddetli ışıklara ihtiyaç vardır. Malzemeden çıkan ışığın şiddeti I aşağıda belirtilen Beer Lambert Yasası ile verilmektedir (Middleton, 1961):

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

Burada I_0 malzemeye gönderilen ışığın şiddeti, I doğrusal soğurmaya uğrayıp malzemedan çıktığı andaki ışık şiddeti, α doğrusal soğurma katsayısı olup malzeme kalınlığı ise x ile gösterilmiştir. Malzeme üzerine düşük şiddetlerde düşürülen bir ışığa malzemenin verdiği tepki doğrusal soğurma katsayısı (α) olarak ifade edilebilir.

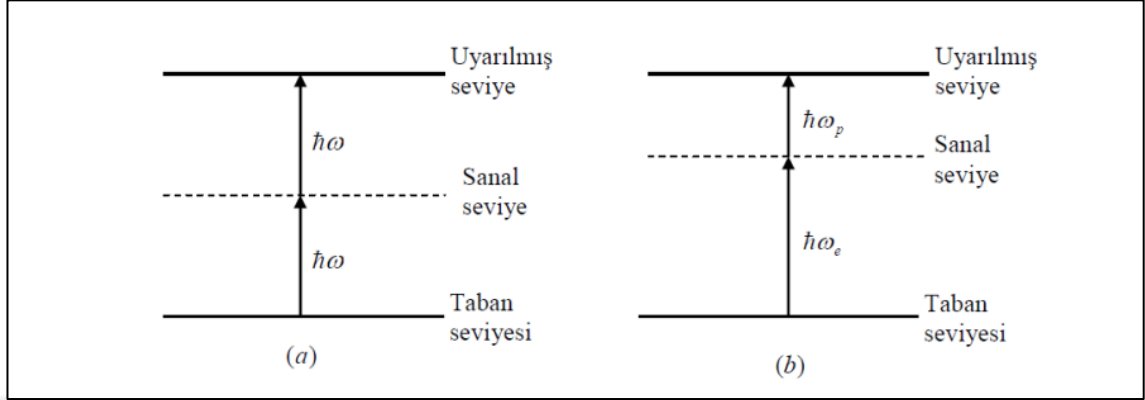
2.1.2 Doğrusal olmayan soğurma

Yüksek ışık şiddetlerindeki ışık-madde etkileşimi şeklinde gerçekleşen doğrusal olmayan soğurma, şiddetin fonksiyonu olarak malzemenin geçirgenliğindeki değişiklik olarak tanımlanır. Lazerin keşfi ile birlikte malzemelerin büyük çoğunluğunda kendiliğinden iki foton soğurmasının yanı sıra çoklu foton soğurması için de çalışma imkanı elde edilmiştir. Doğrusal olmayan soğurmanın, ışık şiddeti arttığında geçirgenliğin doğru orantılı olarak arttığı doyurulabilir soğurma, ters orantılı olarak azaldığı ardışık foton soğurması, iki veya çoklu foton soğurması, uyarılmış durum soğurması ve serbest taşıyıcı soğurması olarak adlandırılan çeşitleri vardır. Doğrusal olmayan soğurma mekanizmalarının doğrusal olmayan spektroskopi, optik veri depolama, optik anahtarlama ve optik sınırlama gibi farklı uygulama alanları vardır.

2.1.2.1 İki foton soğurması

Tek foton soğurması (OPA) enerjiye bağlı doğrusal olan optik bir işlemken, iki foton soğurması (TPA) şiddete bağlı doğrusal olmayan optik bir işlemdir. İki foton soğurması, bir molekülü temel durumdan daha yüksek enerjili uyarılmış bir elektronik duruma uyarmak için aynı veya farklı frekanslardaki iki fotonun soğurulması olayıdır. İki foton soğurmasında gerçekleşebilecek iki farklı olayın şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmektedir. Şekil 2.2(a)’da aynı frekanslı iki fotonun eşzamanlı gerçekleşen soğurulması gösterilirken, Şekil 2.2(b)’de farklı frekanslı iki fotonun eşzamanlı soğurulması gösterilmektedir. Alt ve üst durumlar arasındaki enerji farkı, soğurulan iki fotonun toplam foton enerjilerine eşit veya daha küçüktür. Taban ve uyarılmış durum

seviyeleri arasında kalan sanal seviyeden kaynaklı soğurulan iki fotonun her iki durumda da eş zamanlı olarak gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 2.2 (a) Aynı frekanslı ve (b) Farklı frekanslı iki foton soğurmasının şematik gösterimi

2.1.2.2 Serbest taşıyıcı soğurması

Bant içi soğurma olarak da geçen serbest taşıyıcı soğurması bantlar arası soğurmadan farklıdır çünkü uyarılmış taşıyıcı, iletim bandındaki bir elektron veya hareket etmenin serbest olduğu değerlik bandındaki bir deşik gibi zaten uyarılmış bir bant içindedir. Serbest taşıyıcılar yoluyla ışığın bant içindeki soğurulmasının yoğunluğu, elektronik bant yapısındaki taşıyıcılar ve deşiklerin sayısına ve katkılama işlemi olup olmamasına bağlıdır. Yarıiletkenlerde ise basitçe iletkenlik bandında bulunan elektronun bir fotonu soğurarak yine aynı bant içindeki daha yüksek bir enerji durumuna geçiş yapması şeklinde tanımlanabilmektedir.

2.1.2.3 Uyarılmış durum soğurması

Uyarılmış durum soğurması, bir fotonun daha düşük uyarılmış bir durumdan daha yüksek uyarılmış bir atom, molekül veya iyon durumuna soğurulmasıdır ve ancak bir elektron zaten daha düşük uyarılmış duruma uyarıldıktan sonra gerçekleşebilir. Malzemeye düşürülen ışığın enerjisi doyum şiddetinden çok büyük olduğunda uyarılmış düzey büyük oranda doldurulacaktır. Çok atomlu sistemler ve yarıiletkenlerde bir seviye uyarıldıktan sonra onun yakın bölgelerinde mevcut yüksek yoğunlukta başka seviyeler

vardır. 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 olay uyarılmış durum soğurması (Excited State Absorption-ESA) olarak adlandırılır.



Şekil 2.3 Uyarılmış durum soğurması şematik gösterimi

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi malzemeye düşürülen ışın çok yüksek şiddettedir ve soğurma iki uyarılmış seviye arasında gerçekleşerek elektron birinci uyarılmış seviyeden ikinci uyarılmış seviyeye taşınır.

2.1.2.4 Doyurulabilir soğurma

Doyurulabilir soğurma, ışık şiddeti arttıkça ışığın soğurulmasının azaldığı bir malzeme özelliği olarak tanımlanır. Geçirgenlik (ölçülen atmanın veya ışığın enerjisi) ışık şiddeti arttıkça artar. Yarıiletkenler için doyurulabilir soğurma koşulu gelen foton enerjisinin malzemenin yasak enerji bant aralığından küçük olmasıdır ($\hbar \omega < E_g$). Yüksek şiddetli lazer ışığı gönderilen bir malzemenin şiddete bağlı soğurma katsayısı α (Boyd, 2003):

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}}$$

Burada α_0 doğrusal soğurma katsayısı ve I_s doyuma ulaşma şiddetidir. Doğrusal olmayan soğurma ile gerçekleştirilen optik anahtarlama doyurulabilir soğurma mekanizmasına dayanır. Genellikle kısa ve yüksek enerjili lazer üretimi için pasif Q-anahtarlama kullanılırlar (Fan vd. 2005, He vd. 2004).

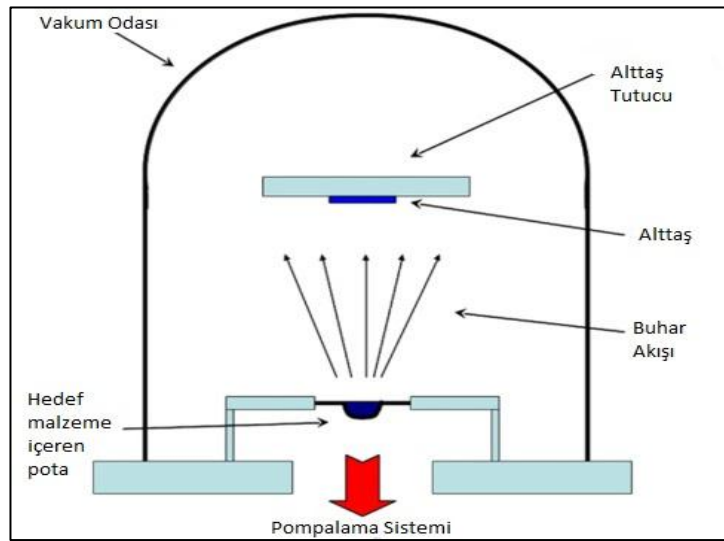


3. MATERYAL ve YÖNTEM

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

3.1 Vakum Altında Isısal Buharlaştırma

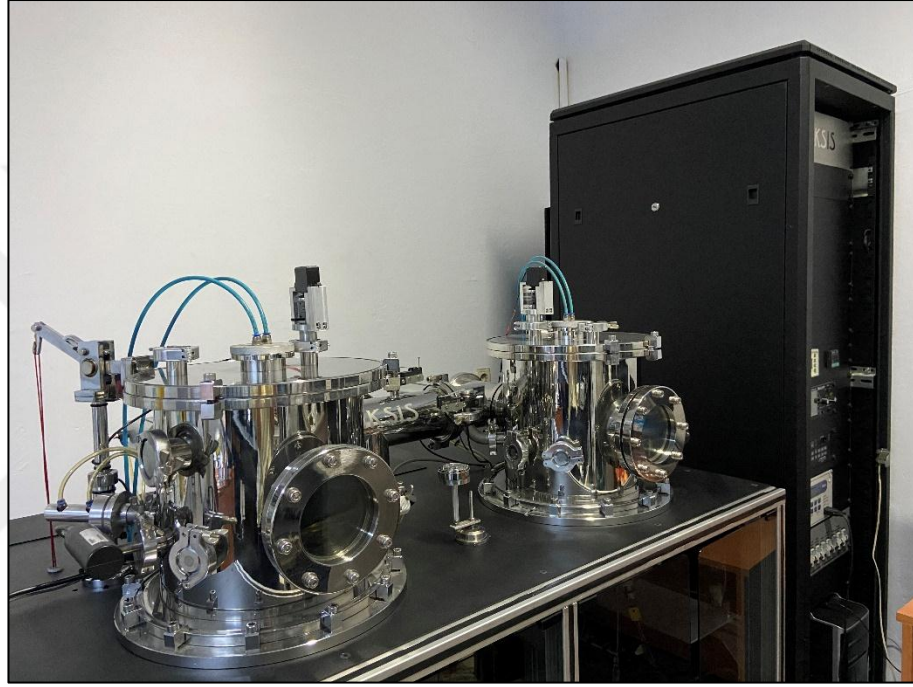
Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition-PVD) tekniklerinden biri olan vakum altında ısısal buharlaştırma, katı haldeki bir malzemenin yüksek vakum altında atomizasyonu ve bu malzemenin kaplanması için alttaş üzerine biriktilmesi işlemidir. Yüksek vakumlu bir ortamda alttaş üzerine yerleştirilen kaplayıcı malzeme bir ısıtıcı ile buharlaştırılır ve buharlaşan atomlar kaplanacak malzeme (alttaş) üzerinde yoğunlaşarak yüzey üzerinde ince bir film katmanı oluşturur. Bu kaplama işlemi 10^{-5} - 10^{-6} ton basınçlı vakum ortamında yapılır. Şekil 3.1’de vakum altında ısısal buharlaştırma yoluyla kaplama sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Uygulanma kolaylığı, yüksek aşınma direnci, taban malzemenin mikro yapısına zarar vermemesi gibi avantajlarından dolayı ince film kaplamalarında büyük ölçüde önem taşımaktadır. Bu yöntem ile yüksek vakum altında kaplama yapıldığı için buharlaşma sıcaklığı oldukça azalır ve böylece kaplanan ince film katmanında kirlilik oranı minimize edilmektedir.



Şekil 3.1 Vakum altında ısısal buharlaştırma ile ince film kaplama sisteminin şematik gösterimi

3.1.1 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletkenlerin ince filmlerinin üretilmesi

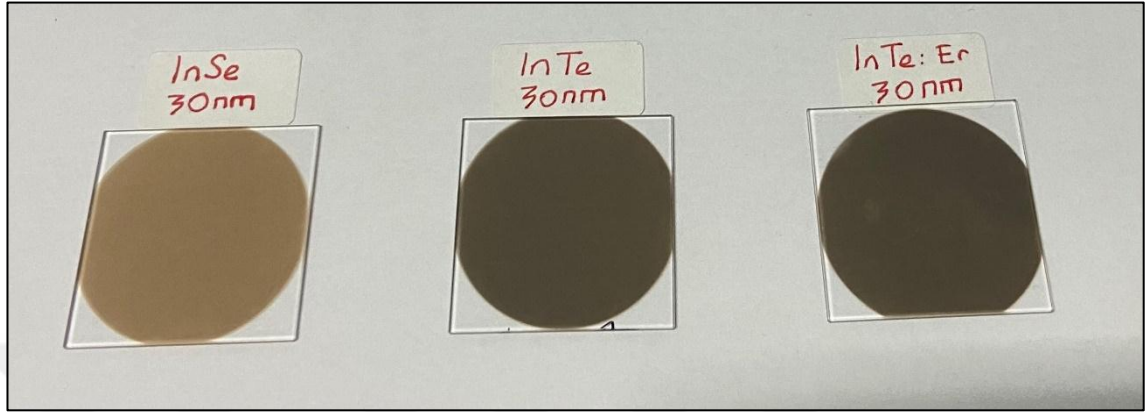
Bölümümüz bünyesindeki Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında bulunan VAKSİS PVD-Handy Twin Çift Vakum Odalı Isısal Buharlaştırma Sistemi (Şekil 3.2) kullanılarak InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken külçe kristallerinden ince filmlerinin büyütülme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Vaksis model ısısal buharlaştırma sistemi

InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin büyütülmesi esnasında sistemden kaynaklı parametrelerin yanı sıra bilgisayar ile kontrol edilebilen basınç ve büyüme hızı gibi parametreler değiştirilerek istenen özellikler sağlandı. Bu büyütme işleminde tungsten kaşık ısı kaynağı olarak kullanıldı ve filmlerin üzerinde büyütüldüğü SiO₂ alttaş tungsten kaşıktan yaklaşık 12 cm yukarıya yerleştirildi. Daha sonra ince film büyütme işleminin en önemli aşaması olan vakum odasının havası boşaltıldı ve basınç 5×10^{-5} Torr olduğunda film kaplama işlemi başlatıldı. Üzerinden kontrollü bir elektrik akımı geçişi sağlanarak tungsten kaşık ısıtıldı. 30-35A (bu akım değerlerinde basınç 4.0×10^{-5} - $5,5 \times 10^{-5}$ Torr aralığında idi) akım aralığında üretilen ince filmler aniden buharlaştı. Buharlaşma sonrası akım küçük aralıklarla büyütme hızı 0.7 Å/s olacak şekilde yavaşça

arttırılarak istenilen kalınlık değerleri elde edilene kadar bu işleme devam edildi. Isısal buharlaştırma yöntemi ile erimiş silika (SiO_2) üzerinde üretilen ince filmler Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

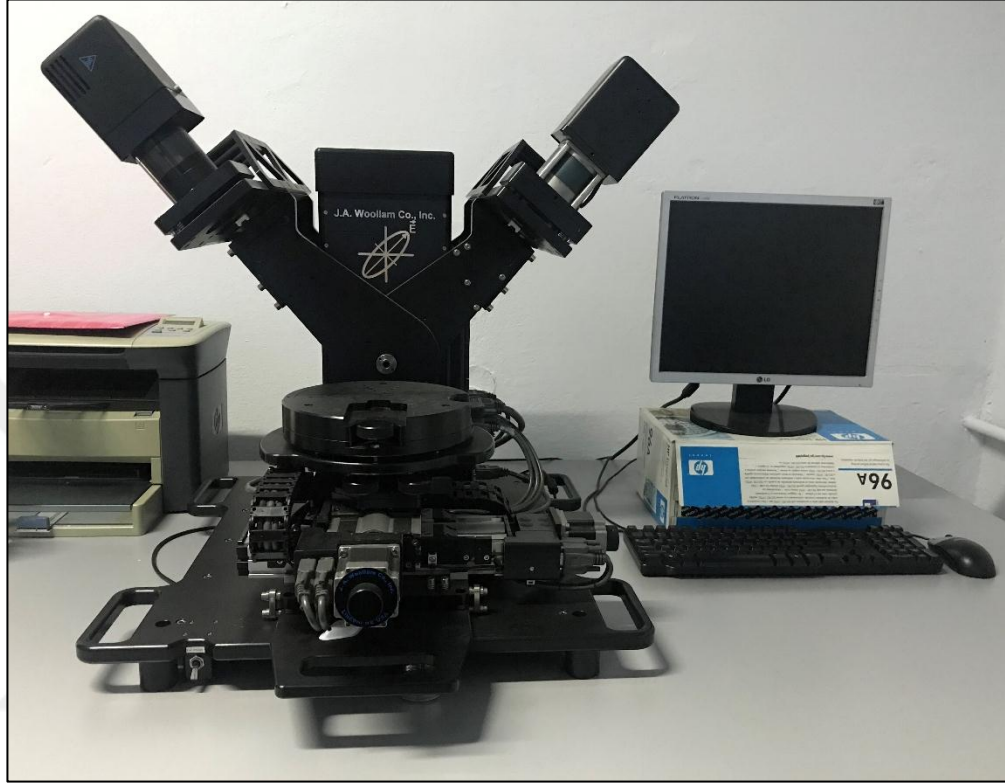


Şekil 3.3 Isısal buharlaştırma sistemiyle erimiş silika alttaş üzerinde üretilen ince filmler

3.2 Spektroskopik Elipsometre

Elipsometre, ince filmlerin katmanlarının kalınlığını ve optik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan bir ölçüm cihazıdır. Işığın bir malzemeden geçmesi veya yansması sırasında polarizasyonundaki değişimi prensibine dayanır ve yüzey hakkında bilgi vermektedir. Elipsometreden düzgün ölçüm alınabilmesi için malzemenin katmanları her yöne aynı moleküler yapıda olup optik olarak homojen olmalı ve önemli miktarda ışığı yansıtabilmelidir. Snell yasasına dayanan elipsometri tekniği ışık kaynağından yollanan kutuplanmamış ışık demeti polarizör yardımı ile doğrusal kutuplanmış ışık demetine dönüştürülür ve doğrusal kutuplanmış ışık demeti çeyrek dalga geciktiricisinden geçirilerek eliptik kutuplu hale getirilip malzeme üzerine çarptırılır. Daha sonra malzemeden doğrusal polarizöre yollanan bu ışık demeti dedektör üzerine düşürülür. Kutuplanmadaki bu değişim ölçülerek malzemenin film kalınlığı, optik sabitleri (alaşım yüzdeleri, optiksel anizotropi, kristallilik), yüzey ve ara yüzey pürüzlülüğü gibi optik özellikleri belirlenebilmektedir.

InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin kalınlıkları Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 3.3' de gösterilen J.A Woolam M2000V marka Spektroskopik Elipsometri cihazı kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4 J.A Woolam M2000V marka Spektroskopik Elipsometri cihazı

3.3 InSe, InTe ve InTe:Er Yarıiletken İnce Filmlerinin Doğrusal Soğurma Katsayısı ve Yasak Enerji Bant Aralıklarının Belirlenmesi

Yarıiletkenlerin, iletim bandı ile değerlik bandı arasında kalan boşluğa bant aralığı, enerji aralığı veya yasak enerji aralığı (E_g) adı verilir. Doğrusal soğurma katsayısı yarıiletkenlerin optik özelliklerini belirlemek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Daha yüksek soğurma katsayısına sahip malzemeler fotonları daha kolay soğurur ve böylece elektronlar iletim bandına daha kolay uyarılır.

Tauc denklemi kullanılarak soğurma katsayıları (α) hesaplanan ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları belirlenebilir:

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (3.1)$$

Burada $h\nu$ gelen ışığın enerjisi, E_g ince filmlerin yasak enerji bant aralığı, A enerji seviyeleri arasında geçiş olasılığını ifade eden birimsiz bir sabittir ve n ise değeri doğrudan geçişler için 0.5, dolaylı geçişler için 2 olan birimsiz bir sabittir.

Yasak enerji bant aralığının belirlenirken soğurma katsayısı (α) ve fotonun enerjisi ($h\nu$) olmak üzere amorf yarıiletkenler için denklem (3.1) kullanılarak foton enerjisine karşılık $(\alpha h\nu)^n$ grafiği çizilir ve grafikte parabolik davranış görülmektedir.

Soğurma katsayısına bağlı olarak amorf yapıdaki yarıiletken ince filmlerin doğrusal soğurma katsayıları için iki durum gözlenmektedir. Soğurma katsayısı $10^4 \text{ cm}^{-1} < \alpha$ ise denklem 3.1 kullanılır, $1 < \alpha < 10^4 \text{ cm}^{-1}$ olduğunda denklem 3.2 kullanılmaktadır (Pankove 1971, Quasrawi 2005).

$$\alpha = \alpha_0 \exp(h\nu/E_U) \quad (3.2)$$

Burada α_0 bir sabittir, $h\nu$ foton enerjisi ve E_U yerleşmiş seviyelerin bant kuyruğunun genişliğini temsil etmektedir.

Bu tez çalışmasında, InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma özelliklerini incelemek için Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvar'ında bulunan Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi (Şekil 3.4) kullanılmıştır. Morötesi ve görünür ışık dalga boyu aralığını kapsayan UV-VIS Spektrometresinin çalışma prensibi bir ışık demetinin bir malzemeden geçirilmesi veya malzeme yüzeyinden yansıtılması ile meydana gelen azalmanın ölçülmesi ilkesine dayanır. Yapılan bu ölçüm sayesinde malzemeden belli spektrumlarda geçirilen ışınların ne kadarının soğrulduğu analiz edilebilmektedir. Doğrusal soğurma spektrumları alınacak ince filmlerden önce referans ve malzeme haznesine iki tane erimiş silika alttaştırılarak belirlenen dalga boyu aralığında tarama yapıldı. Böylece alınan bu baseline ile alttaştan kaynaklı etkiler önlemlendi ve daha

sonra örnek haznesindeki erimiş silika alttaş yerine ölçümleri alınacak ince filmler sırayla yerleştirilerek tarama işlemleri gerçekleştirildi.



Şekil 3.5 Shimadzu UV-1800 marka doğrusal soğurma spektrometresi

3.4 Urbach Enerji Değerlerinin Belirlenmesi

Urbach enerjisi, malzemenin yapısal özelliklerin yanı sıra dış faktörlerin neden olduğu kristal kafes düzensizliği nedeniyle soğurma kenarı bulaşmasının derecesini karakterize eder. Urbach enerjisi, $\ln\alpha'$ ya karşı $h\nu$ grafiği çizilerek hesaplanır. Optik bant aralığının altındaki lineer kısmın eğimlerinin tersi, E_u değerini verir. Urbach kuralına göre tanımlanır,

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \quad (3.4)$$

$$\ln\alpha = \ln\alpha_0 + \left(\frac{h\nu}{E_u}\right) \quad (3.5)$$

Burada α_0 bir sabit, $h\nu$ gelen fotonun enerjisi ve E_U bant aralığındaki yerleşmiş seviyelerin bant kuyruğunun genişliğini (Urbach enerjisi) temsil eder. (3.4)

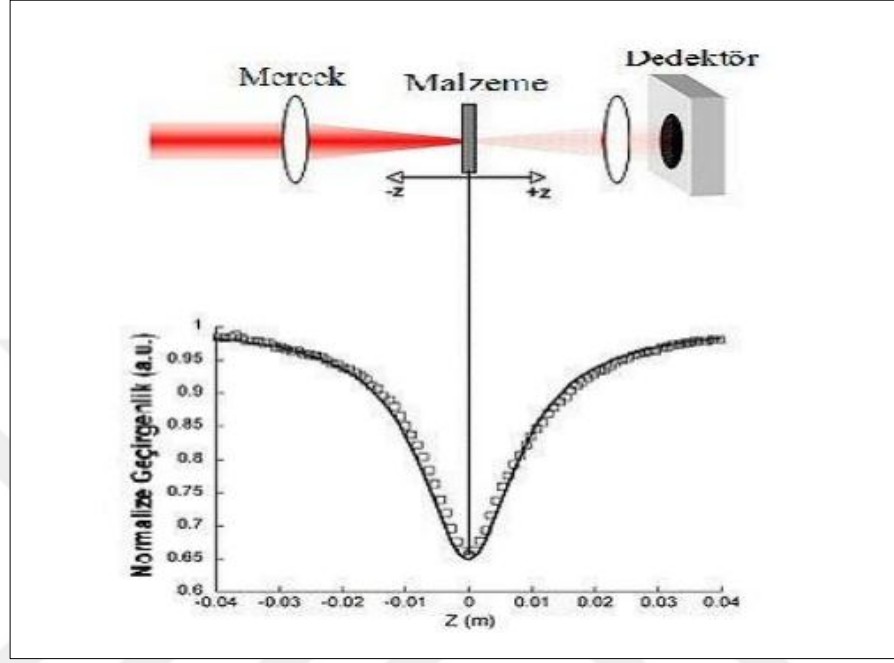
3.5 Z-tarama Tekniği

1989 yılında Bahae ve çalışma arkadaşlarının sayesinde icat edilen Z-tarama tekniği, doğrusal olmayan optik malzemelerin karakterizasyonlarının yapılmasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Xia, 1994). Malzemelerin üçüncü dereceden optik alınganlıklarını (χ^3) bulmak için kullanılan Z-tarama tekniği, malzemenin Gaussian lazer demetinin mercekle odağı etrafında hareket ettirilmesi ilkesine dayanır. Malzemenin z-konumuna bağlı olan geçirgenliğine dayalı olan bu teknik ile incelenen malzemelerin doğrusal olmayan soğurma katsayısı (β) ve doğrusal olmayan kırılma ($n(I)$) özellikleri belirlenerek malzeme karakterizasyonu yapılmaktadır. Açık ve kapalı yarık Z-tarama olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışması doğrusal olmayan kırılma indisini kapsamadığı için kapalı yarık Z-tarama tekniğinden bahsedilmeyecektir.

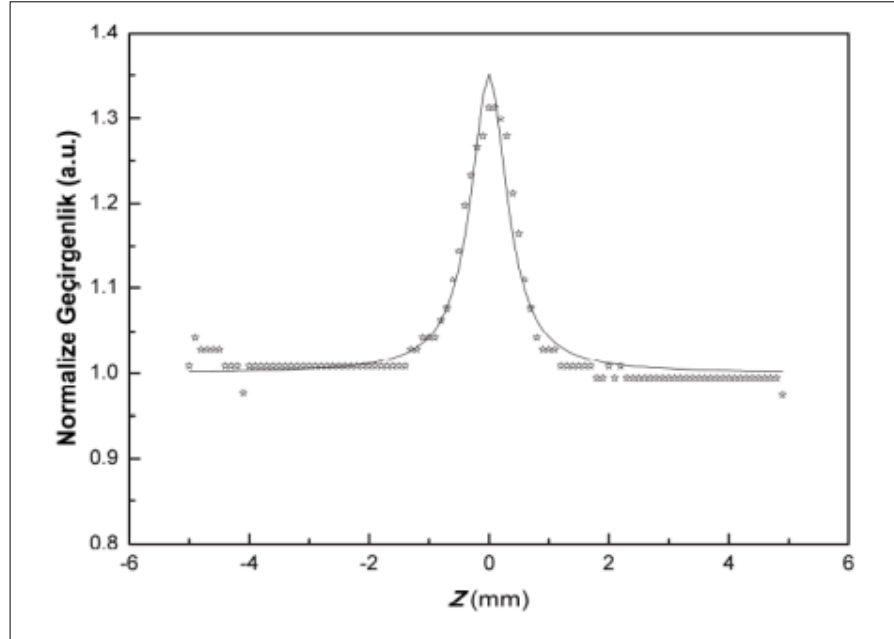
3.5.1 Açık yarık Z-tarama tekniği

Açık yarık Z-tarama deneyi ile 3. dereceden optik alınganlığın sanal kısmıyla ilgili olan (χ^3) ortamın doğrusal olmayan soğurma katsayısı (β) (Şekil 3.7) hesaplanabilmektedir. Odağa yaklaşıp uzaklaşırken malzemenin doğrusal olmayan soğurması değişen ışık yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Malzemenin odak etrafında hareket ettirilmesiyle malzemenin geçirgenliği ya artar ya da azalır. Malzemenin geçirgenliğindeki azalma odak noktasına yaklaştıkça yeterli şiddete ulaşıldığında gerçekleşmektedir. Odaktaki bu azalma en yüksek değerdedir ve bu olaya doğrusal olmayan soğurma denir. Şiddetin en yüksek olduğu nokta odaktır ve doğrusal olmayan soğurma bu noktada maksimum değerini almaktadır. Bu noktada dedektör tarafından okunan enerji değerleri maksimum 1 olacak şekilde normalize edilerek geçirgenliğin konuma bağlı değişimi Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Malzemenin geçirgenliğindeki artış ise odak noktasından uzaklaştıkça gerçekleşmektedir. Odaktaki bu artış en yüksek değerdedir ve odaktan uzaklaştıkça azalmaya başlar. Odak noktasına

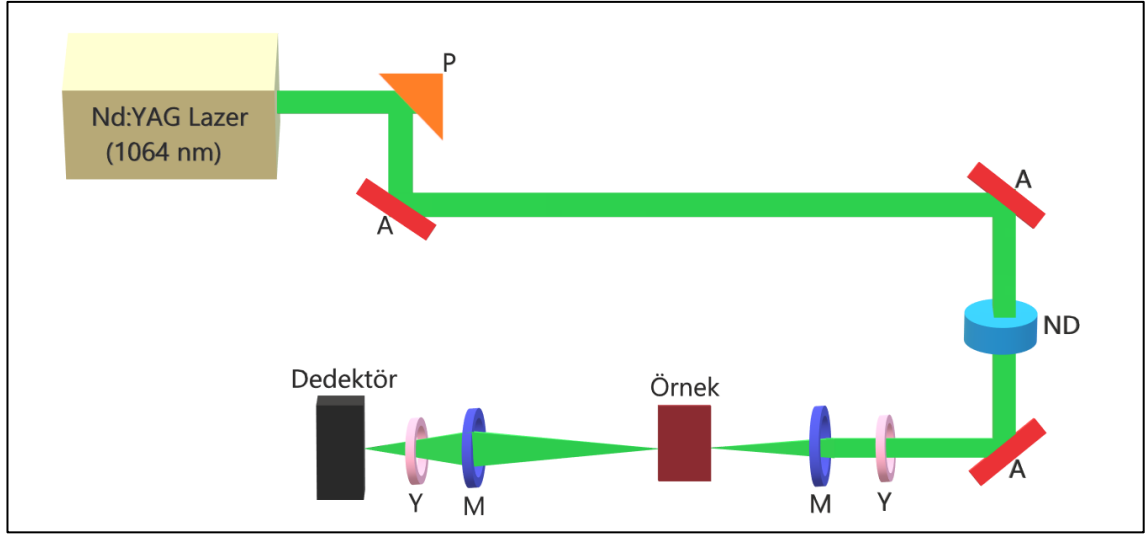
yaklaşıldıkça gözlenen geçirgenlikteki bu artış eğilimine doyurulabilir soğurma denir. Bu noktada dedektör tarafından okunan enerji değeri minimum 1 olacak şekilde normalize edilerek geçirgenliğin konuma bağılı değişimi şekil 3.7’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Doğrusal olmayan soğurma eğrisi



Şekil 3.7 Doyurulabilir soğurma grafiğı



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)

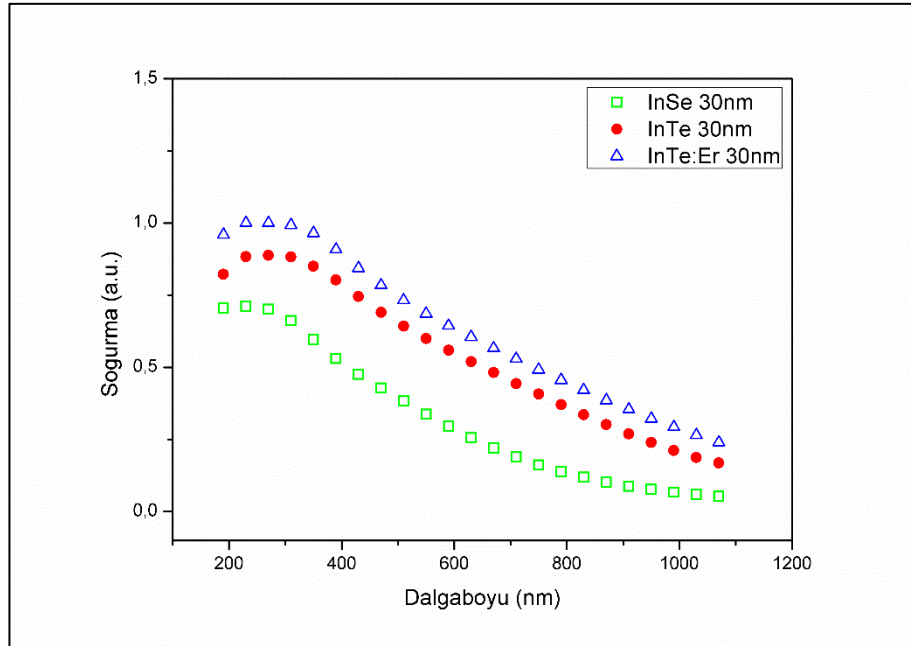
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez kapsamında ısıt buharlaştırma yöntemi yardımıyla farklı kalınlıklarda kaplanan InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerin doğrusal optik özellikleri, yapıları ve doğrusal olmayan optik soğurma özellikleri incelendi. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

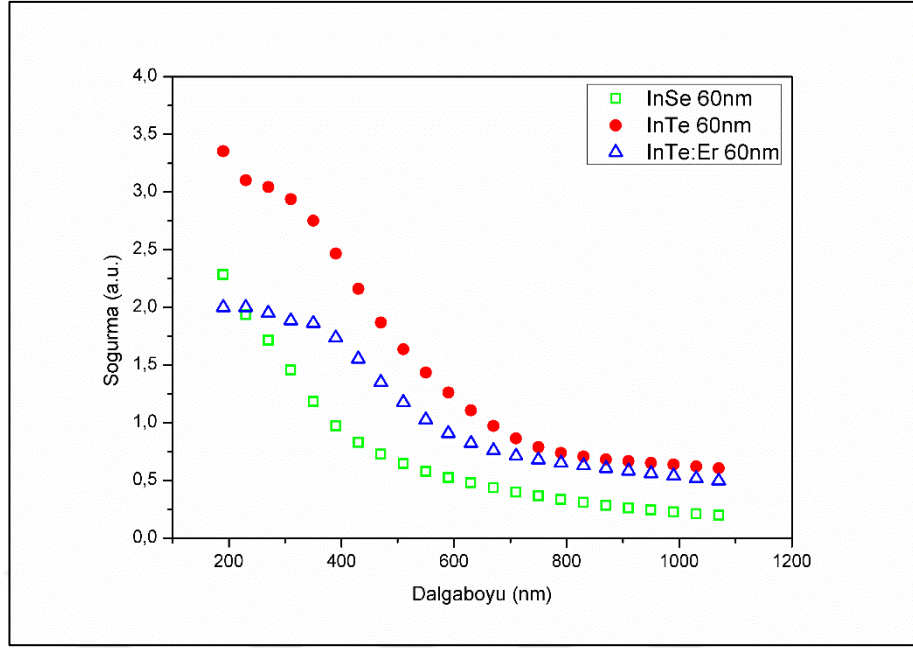
4.1 InSe, InTe ve InTe:Er Yarıiletken İnce Filmlerinin Ölçüm Sonuçları

4.1.1 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları

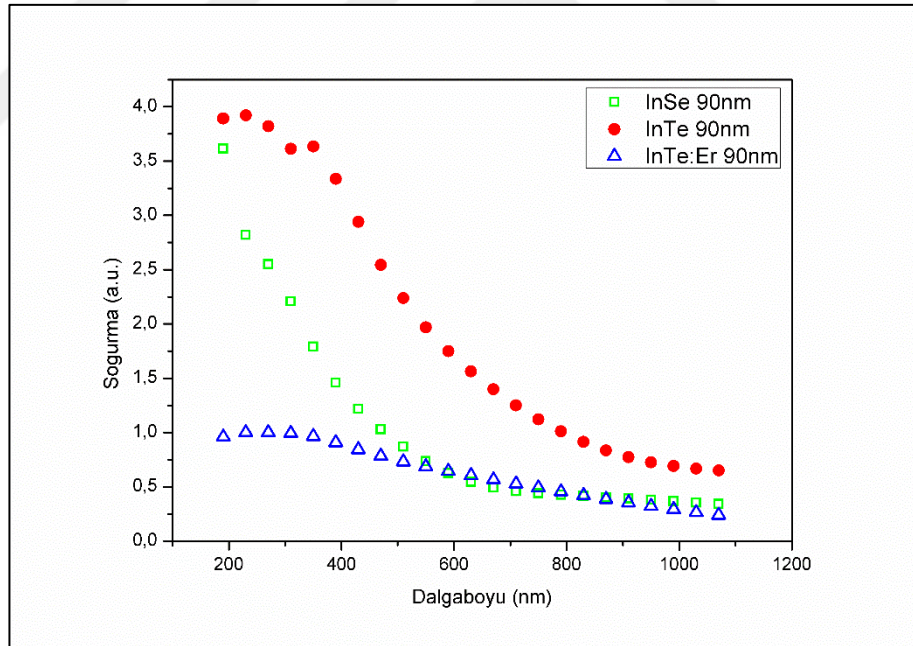
Termal buharlaştırma sistemi yardımı ile 30 nm, 60 nm ve 90 nm olmak üzere üç farklı kalınlıkta üretilen InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerin doğrusal soğurma analizleri Shimadzu UV-1800 spektrometre kullanılarak yapılmıştır ve doğrusal soğurma spektrumları Şekil 4.1-3'te gösterilmiştir. Şekil 4.1-3'te gösterilen grafiklerin soğurma kenarlarında eksponansiyel davranış göz önüne alındığında yasak enerji bant aralıklarında kusur seviyelerinin olduğu göstermektedir.



Şekil 4.1 30 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları



Şekil 4.2 60 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları



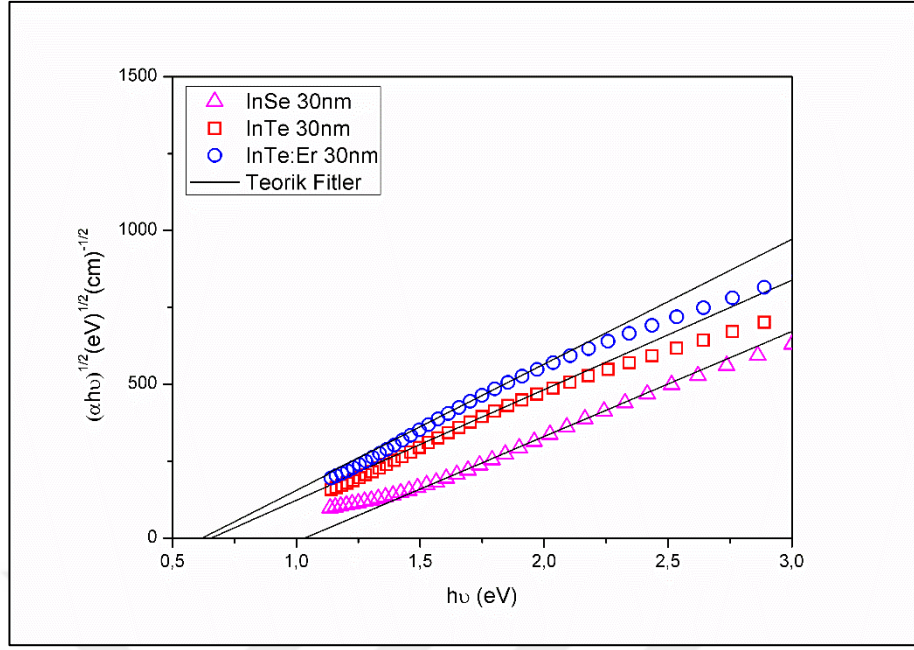
Şekil 4.3 90 nm InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal soğurma spektrumları

4.1.2 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları

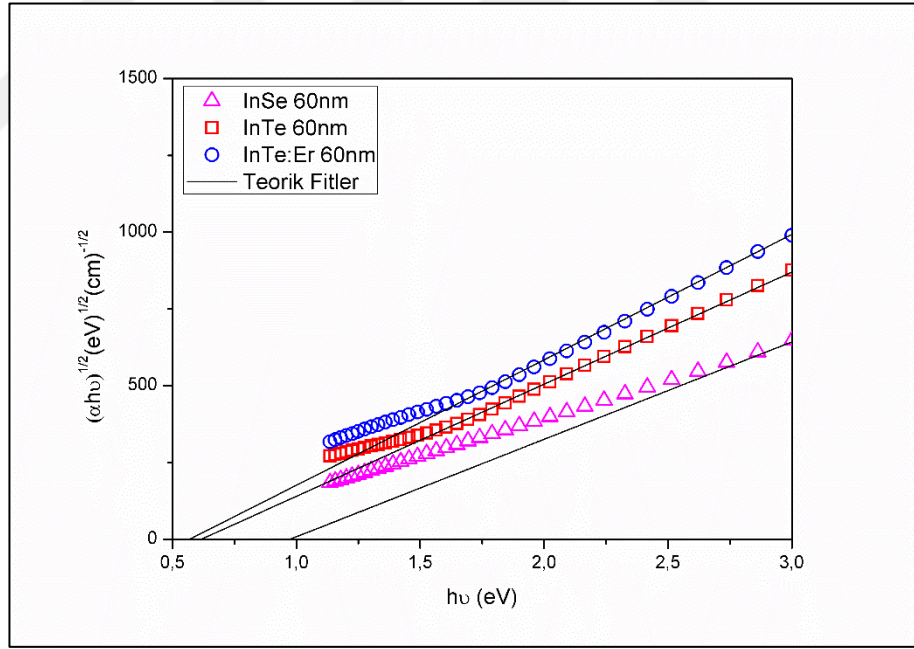
Doğrusal soğurma spektrumundan alınan veriler ile amorf yarıiletken ince filmlerin yasak enerji bant aralıkları hesaplanırken $n=2$ ($m=1/2$) olarak alındı ve grafik çizimleri yapıldı. Grafiklerde doğrusal bir davranış gözlenerek dolaylı bant geçişleri olduğu saptanarak bant aralıkları hesaplanmıştır. Şekil 4.4-6'da ince filmlerin sırasıyla 30 nm, 60 nm ve 90 nm kalınlıklarındaki bant aralıkları gösterilmektedir. Elde edilen grafikler yardımıyla 30 nm, 60 nm ve 90 nm olmak üzere üç ayrı kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er için yasak enerji bant aralığı değerleri Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 InSe, InTe ve InTe: Er ince filmlerinin E_g değerleri

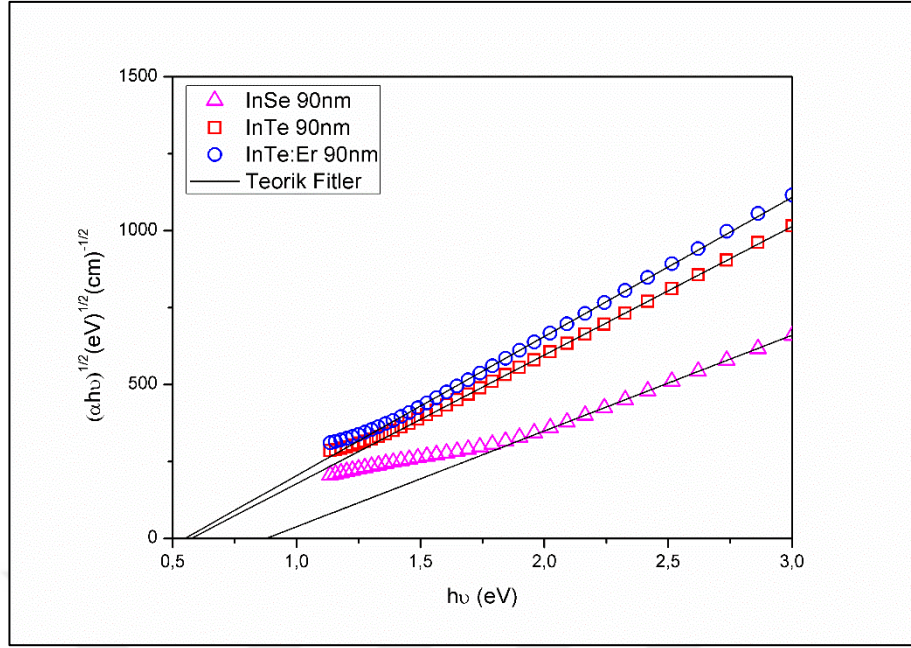
<i>Malzeme</i>	<i>Kalınlık (nm)</i>	<i>E_g (eV)</i>
InSe	30	1.03
	60	0.97
	90	0.87
InTe	30	0.63
	60	0.61
	90	0.57
InTe: Er	30	0.61
	60	0.57
	90	0.55



Şekil 4.4 30 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları



Şekil 4.5 60 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları



Şekil 4.6 90 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları

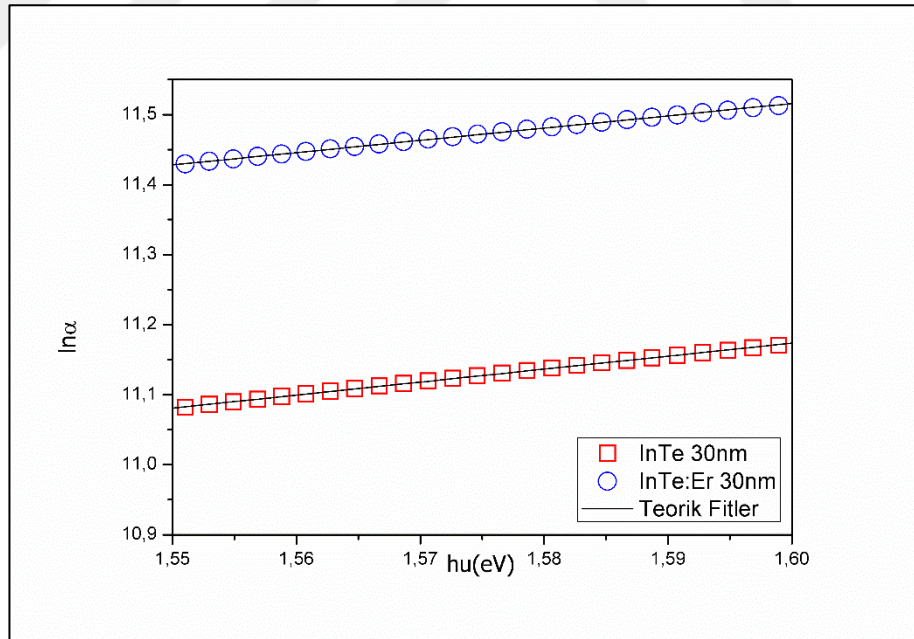
Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere artan kalınlık ve yapılan katkılama işlemleri ile yasak enerji bant aralığı değerleri azalan bir eğilim göstermektedir. Aynı zamanda yasak enerji bant değerleri artan kusur seviyeleri ile birlikte bant kuyruklarının yasak enerji bant aralığının içine daha fazla genişlemesi sonucu azalan bir eğilim göstermiş olabilir.

4.1.3 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin Urbach enerjileri

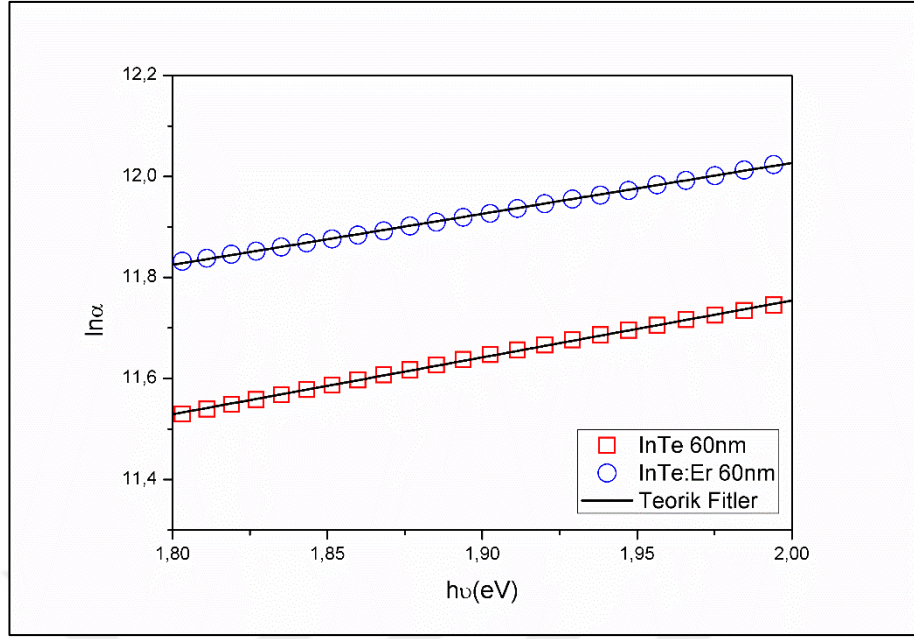
InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerin Urbach enerjileri doğrusal soğurma spektrumundan elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun için Denklem 3.5 kullanılarak Şekil 4.7-10’da gösterilen $\ln \alpha$ vs. $h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Çizilen doğru grafiklerinin eğimleri bulunup daha sonra tersleri alınarak InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin Urbach enerjileri hesaplanmıştır. 30 nm, 60 nm ve 90 nm olmak üzere üç ayrı kalınlık için InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin Urbach enerjileri aşağıdaki Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 InSe, InTe ve InTe: Er ince filmlerinin E_u değerleri

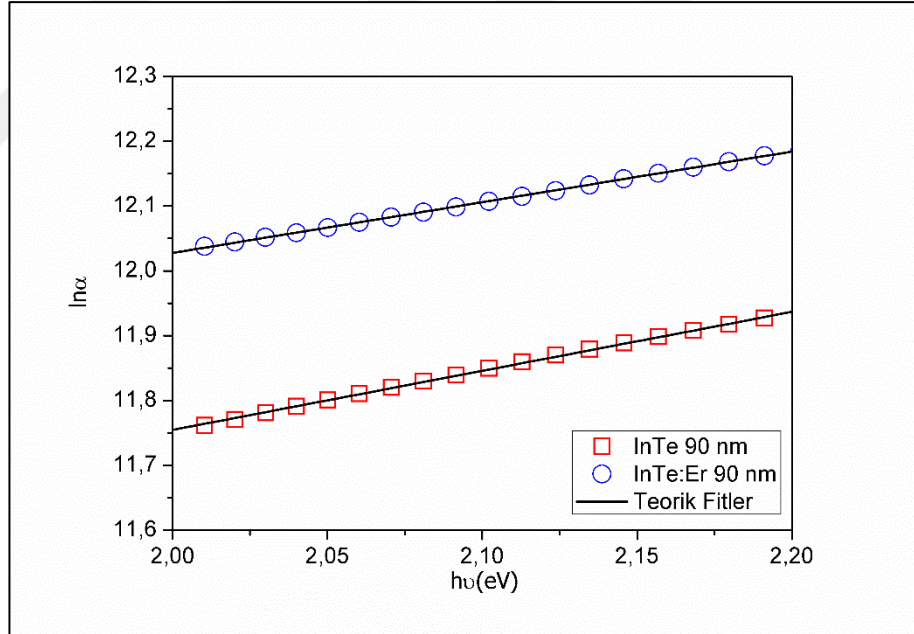
<i>Malzeme</i>	<i>Kalınlık (nm)</i>	<i>Eu (eV)</i>
InSe	30	0.51
	60	0.76
	90	0.95
InTe	30	0.53
	60	0.89
	90	1.10
InTe: Er	30	0.57
	60	0.99
	90	1.28



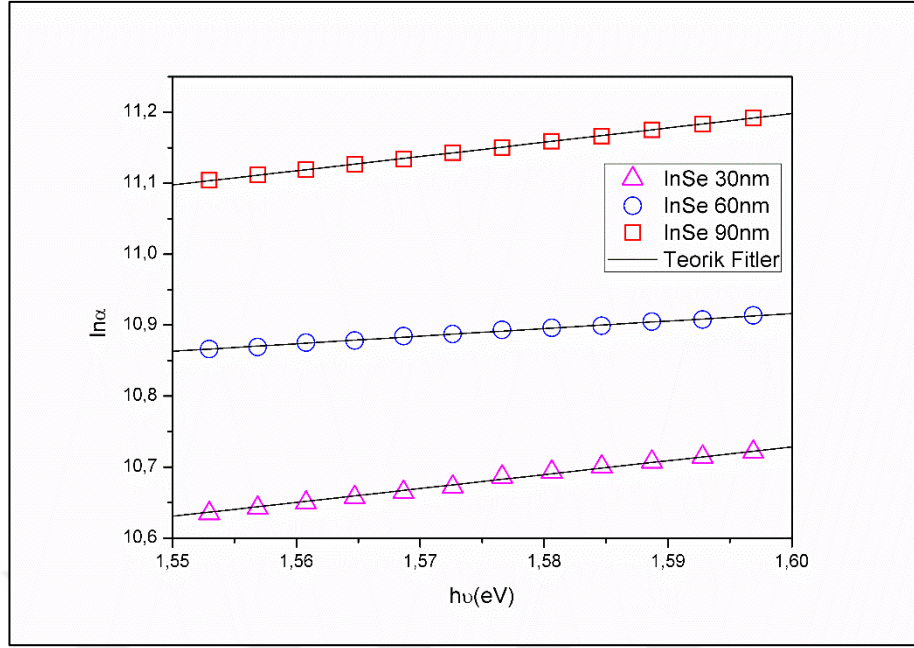
Şekil 4.7 30 nm InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha$ - $h\nu$ grafiği



Şekil 4.8 60 nm InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha$ - $h\nu$ grafiği



Şekil 4.9 90 nm InTe ve InTe:Er ince filmlerin $\ln\alpha$ - $h\nu$ grafiği

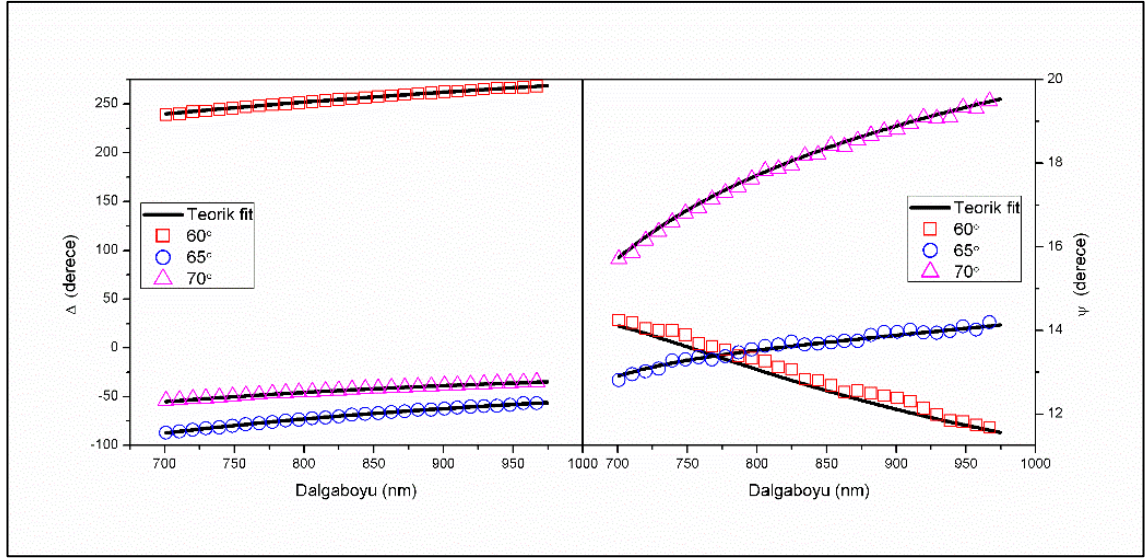


Şekil 4.10 30 nm, 60 nm ve 90 nm kalınlıkta InSe ince filmlerinin $\ln\alpha$ - $h\nu$ grafiği

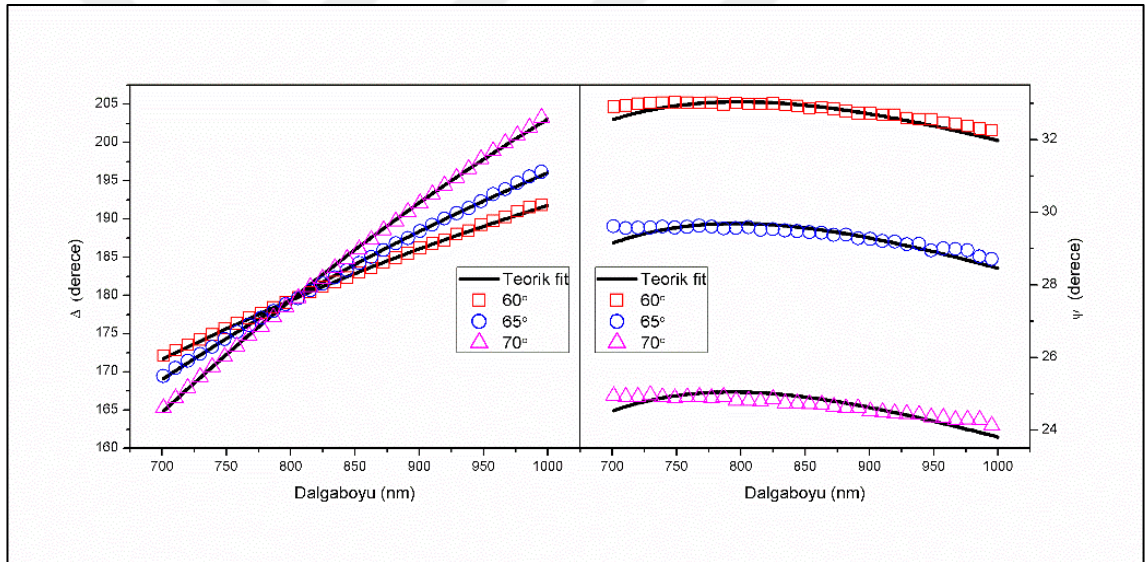
Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerinin Urbach enerji değerleri kalınlık arttıkça artan bir eğilim göstermiştir. Buna ek olarak, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmleri kendi aralarında kıyaslandığında ise yapılan Erbiyum katkılama işlemi sonucu katkı atomlarının oluşturdukları kusur seviyeleri nedeniyle bant kuyrukları genişlemiş ve Urbach enerji değerleri artmıştır.

4.1.4 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin kalınlık ölçümleri

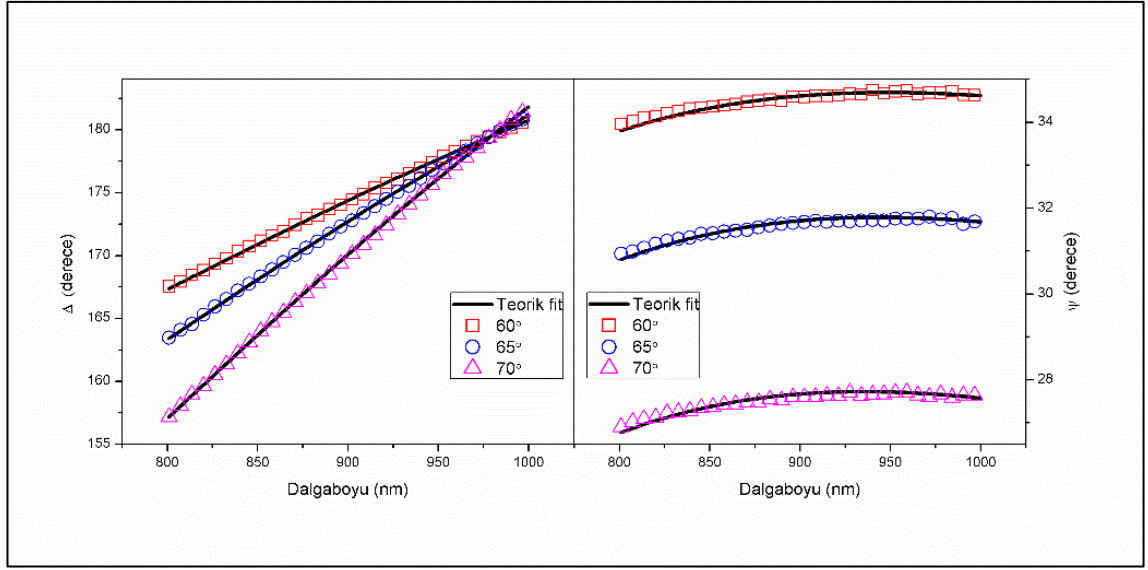
Amorf ince filmlerin kalınlıklarını belirlemek için spektroskopik elipsometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kalınlıkların hesaplanmasında kullanılan ψ ve Δ parametrelerin dalgaboyuna bağlı grafikleri Şekil 4.11-13’te gösterilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda ince filmlerin kalınlıkları 30 nm, 60 nm ve 90 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.11 60 nm InSe amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri



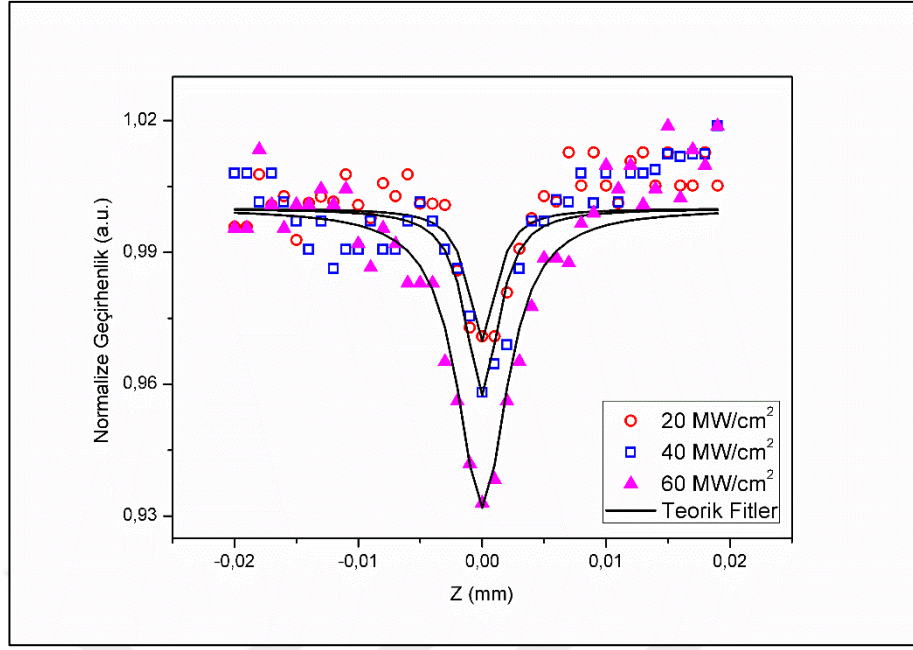
Şekil 4.12 60 nm InTe amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri



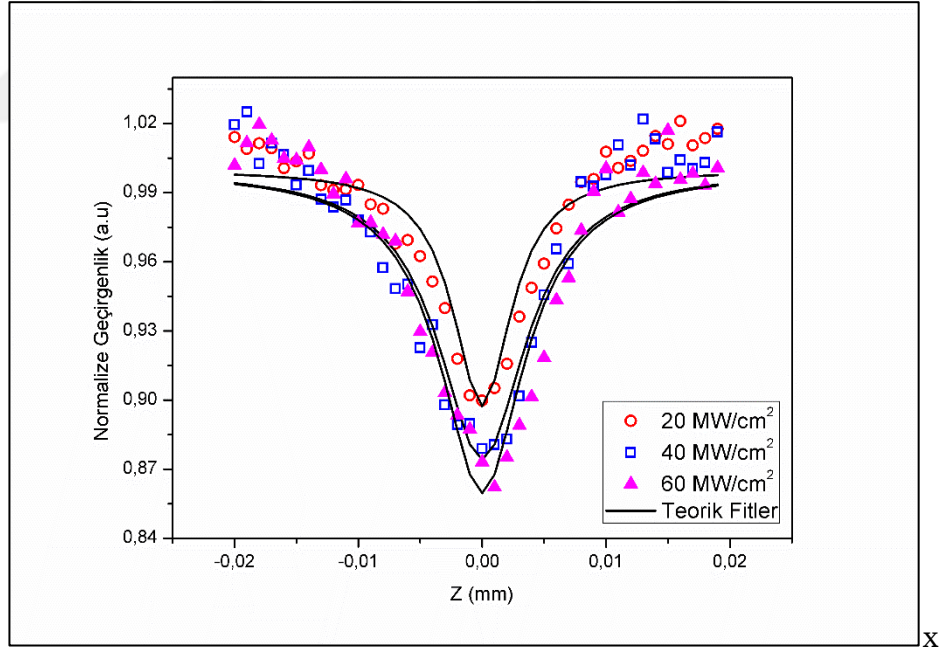
Şekil 4.13 60 nm InTe:Er amorf ince filminin spektroskopik elipsometre verileri

4.1.5 InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma özellikleri

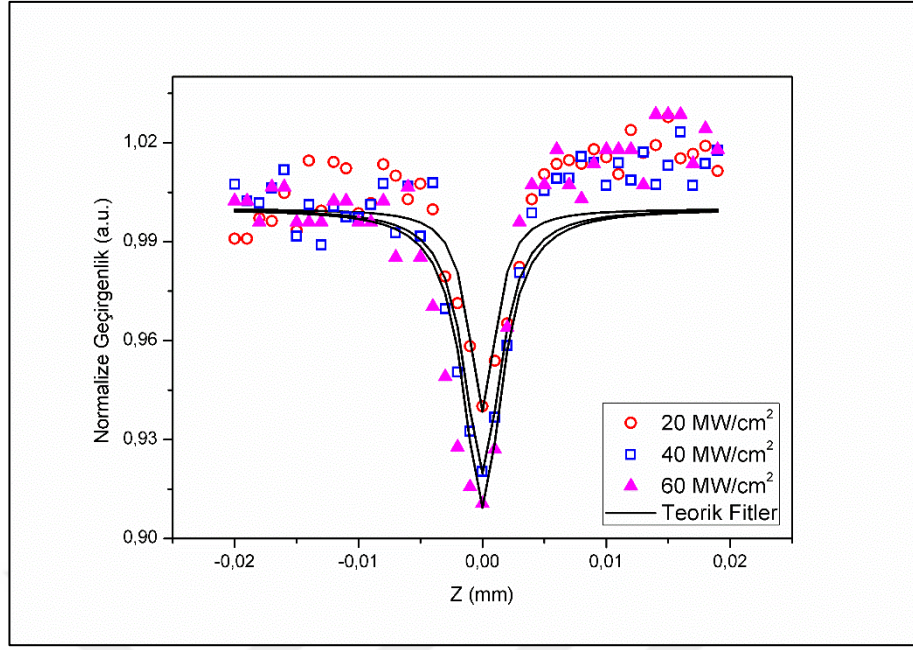
Atma süresi 4 nanosaniye olan lazer kullanılarak 30 nm, 60 nm ve 90 nm InSe, InTe ve InTe:Er yarıiletken ince filmlerinin doğrusal olmayan soğurma davranışları incelendi. Yapılan Z-tarama deney sonuçlarının arıtımı ile aynı kalınlık değerlerindeki ince filmlerinden farklı şiddetlerde elde edilen doğrusal olmayan soğurma verileri incelenmiştir ve Şekil 4.12-14’de 30 nm kalınlıktaki veri sonuçları grafik formatında verilmektedir.



Şekil 4.14 30 nm kalınlıkta InSe yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarıık Z-tarama grafiğı



Şekil 4.15 30 nm kalınlıkta InTe yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarıık Z-tarama grafiğı



Şekil 4.16 30 nm kalınlıkta InTe:Er yarıiletken ince filminin farklı şiddetlerde nanosaniye açık yarık Z-tarama grafiği

Çizelge 4.3 InSe, InTe ve InTe: Er nanosaniye Z-tarama deneyleri ile elde edilen I_{sat} ve β_{eff} değerleri

<i>Malzeme</i>	<i>Kalınlık(nm)</i>	<i>I_o (MW/cm²)</i>	<i>β_{eff} (cm/MW)</i>	<i>I_{sat} (MW/cm²)</i>
InSe	30	20	5.34 x 10 ³	5.00 x 10 ³
		40	3.47 x 10 ³	
		60	3.31 x 10 ³	
		60		
	60	20	7.51 x 10 ³	5.31 x 10 ³
		40	5.23 x 10 ³	
		60	5.02 x 10 ³	
	90	20	8.90 x 10 ³	5.60 x 10 ³
		40	6.42 x 10 ³	
		60	5.72 x 10 ³	
InTe	30	20	8.45 x 10 ³	5.09 x 10 ³
		40	5.17 x 10 ³	
		60	4.06 x 10 ³	
	60	20	9.01 x 10 ³	5.63 x 10 ³
		40	6.91 x 10 ³	
		60	5.72 x 10 ³	
	90	20	9.41 x 10 ³	6.83 x 10 ³
		40	7.83 x 10 ³	
		60	6.91 x 10 ³	
InTe:Er	30	20	9.05 x 10 ³	5.29x 10 ³
		40	7.01 x 10 ³	
		60	5.59x 10 ³	
	60	20	9.51 x 10 ³	5.85 x 10 ³
		40	7.98 x 10 ³	
		60	6.83 x 10 ³	
	90	20	1.00 x 10 ⁴	7.55 x 10 ³
		40	8.27 x 10 ³	
		60	7.34 x 10 ³	

Şekil 4.13-16’da görüldüğü üzere 30 nm kalınlıkta InSe, InTe ve InTe:Er ince filmlerinin yoğunlukları arttırıldığında soğurma davranışlarında artış gözlemlenirken Çizelge 4.3’de verilen β_{eff} değerleri azalmaktadır. Bu sonuç soğurmanın arttığı halde beklenen yüksek şiddetlerde olmadığını ve β_{eff} değerlerinin azalmaya yani doyurulabilir soğurmanın güçlenmeye başladığını işaret etmektedir. Deneyler esnasında

malzemelerin zarar görmemesi ve sonuçların güvenilir olmasını sağlamak için önce lazer darbesinin yoğunluğunu neredeyse optik hasar eşiği noktasına kadar tekrar tekrar arttırarak ve ardından yoğunluğu tekrar tekrar azaltarak gerçekleştirilmiştir. Ancak doyurulabilir soğurmanın (SA) uyarılmış durum soğurmasına (ESA) baskın olduğu hiçbir noktada geçirgenlikte bir artış gözlenmez.



5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında InSe, InTe ve InTe:Er amorf yarıiletken ince filmlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan optik özellikleri incelendi.

Isısal buharlaştırma sistemi yardımıyla üç farklı kalınlıkta üretilen ince filmlerin doğrusal spektrumları Şekil 4.1-3'te gösterilmiştir. Malzemelerin kalınlık ölçümleri spektroskopik elipsometre kullanılarak 30 nm, 60 nm ve 90 nm olarak ölçülmüştür ve ölçüm sonuçları Şekil 4.11-13'te verilmiştir. Doğrusal spektrumlar incelendiğinde soğurma kenarlarında keskin bir artış olmayışı yasak enerji bant aralıklarında kusur seviyelerinin varlığına işaret etmektedir. Bu kusurlar elektronik bant yapısını değiştirir ve amorf katıların bant aralığı içinde kusur seviyeleri olarak adlandırılan enerji seviyelerini ortaya çıkarır. Soğurma spektrumlarının arıtılması ile yasak enerji bant aralıkları Şekil 4.4-6'da verilmiştir ve değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere malzemelerdeki kalınlık artışı ile yasak enerji bant değerlerinde azalma gözlenmektedir. Buna ek olarak malzemelerin yasak enerji bant değerleri artan kalınlığa karşı 1.11 eV'dan küçük çıkmıştır. Bu durum malzemelerin dar bant aralıklı yarıiletken olduklarını göstermektedir. Soğurma verileri kullanılarak çizilen $\ln\alpha$ - $h\nu$ grafiklerinden (Şekil 4.7-10) malzemelerin Urbach enerjileri elde edilmiş ve değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Malzemelerdeki kalınlık artışı ve malzemelerde oluşan kusur seviyeleri sonucu Urbach enerjilerinin arttığı gözlenmiştir. İnce filmlerin doğrusal olmayan davranışları açık yarık Z-tarama tekniği ile gözlenmiştir. Kullanılan 1064 nm dalgaboylu Nd:YAG lazerinin enerjisi (1.16 eV) malzemelerin yasak enerji bant aralıklarından büyük olduğu için değerlik elektronlarının iletim bandına uyarılması tek foton soğurması OPA ile gerçekleşmiş ve açık yarık Z-tarama ölçümü, uyarılmış durum soğurmasının (ESA) tüm yoğunluklarda doğrusal olmayan soğurmaya (NLA) hakim olduğunu göstermiştir. Doyurulabilir soğurma (SA) ve uyarılmış durum soğurmasının (ESA) doğrusal olmayan soğurmaya (NLA) katkısı sonucu kristal katıların aksine, amorf ince filmlerin doğrusal olmayan soğurma (NLA) davranışının, bant aralığı içindeki kusur durumlarının varlığı ile doğrudan şekillendirildiğini gösterir. Kusur durumlarını anlamak ve kontrol edebilmek son derece önemlidir, çünkü son çalışmalar doğrusal olmayan soğurma (NLA) özelliklerinin, ince filmlerin kalınlığının

değiştirilmesi veya katkılama yoluyla kusur durumlarının yoğunluğunun değiştirilmesi yoluyla kontrol edilebileceğine işaret etmiştir. InSe, InTe ve InTe:Er örnekleri için açık yarık Z-tarama deneylerinden elde edilen en büyük etkin doğrusal olmayan soğurma katsayısı (β_{eff}) 90 nm kalınlıkta sırasıyla 8.90×10^3 cm/MW, 9.41×10^3 cm/MW ve 1.00×10^4 cm/MW ve en düşük doyum eşik şiddeti (I_{sat}) 30 nm kalınlıkta sırasıyla 5.00×10^3 MW/cm², 5.09×10^3 MW/cm² ve 5.29×10^3 MW/cm² olarak hesaplanmıştır. Artan yoğunluklarla azalan β_{eff} değerlerinin ve daha kalın ve katkılı filmlerin artan I_{sat} değerlerinin gözlemlenmesi, ayrıca, kusur durumlarının doldurulması nedeniyle doyurulabilir soğurmanın (SA) uyarılmış durum soğurmasını (ESA) domine ettiği gözlenmiştir. Örneklerin küçük I_{sat} değerlerine sahip olması pasif Q-anahtarlama da doyurulabilir soğurucu olarak kullanılabileceğini ve büyük β_{eff} değerlerine sahip olmaları ise optik sınırlama için uygun olduklarını göstermektedir. Doyum doğrusal olmayan soğurma gözlenmemesi ve bunun geniş spektrumda gözlenmesi (orta kızılötesi bölgeye kadar) göz önüne alındığında örnekleri orta kızılötesi optik sınırlama ve fotovoltaiik uygulamalar için potansiyel bir aday yapar.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular doğrultusunda “Single photon resonant nonlinear absorption in narrow bandgap amorphous semiconductor: a concept study for InTe” isimli bir makale “Journal of Luminescence” dergisinde yayın aşamasındadır.

KAYNAKLAR

- A. Karatay, C. Aksoy, H.G. Yaglioglu, A. Elmali, U. Kurum, A. Ates, N. Gasanly, J Optics-Uk, 13 (2011).
- A. Karatay, H.G. Yaglioglu, A. Elmali, M. Parlak, H. Karaagac, Opt Commun, 285 (2012), pp. 1471-1475.
- A. Karatay, B. Kucukoz, G. Cankaya, A. Ates, A. Elmali, Opt Mater, 73 (2017), pp. 20-24.
- A. Saenz-Trevizoa, P. Amezaga-Madrid, P. Piza-Ruiz, W. Antunez-Flores, M. Miki-Yoshida, Mater Res-Ibero-Am J, 19 (2016), pp. 33-38.
- Adduci, F., Catalano, I. M., Cingolani, A. and Minafra, A. 1977. Direct and indirect 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.
- Boyd, R.W.,1992, Nonlinear Optics, Academic Press, pp. 21-33.
- Boyd R. W., Nonlinear Optics. San Jose: Academic Press; 2003.
- 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.
- 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.
- Frequencies in a Nonlinear Dielectric. Appl. Phys. Lett. Vol. 2, pp.136-137.
- F.L. Hu, J. Zhou, X. Liu, R. Chen, W.S. Fu, Y.C. Wei, Crystengcomm, 15 (2013), pp. 1194-1198
- 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.
- F. Urbach, Phys Rev, 92 (1953), pp. 1324-1324.
- H. Ertap, M. Yuksek, A. Karatay, A. Elmali, M. Karabulut, Chinese J Phys, 59 (2019), pp. 465-472

- He J.L., Fan Y.X., Du J., Wang Y.G., Liu S., Wang H. T., Zhang L.H. and Hang Y., "4-ps passively modelocked Nd : Gd_{0.5}Y_{0.5}VO₄ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror", *Opt Lett*, 29: 2803-2805, (2004).
- J. Zhang, T. Jiang, X. Zheng, C. Shen, X.A. Cheng, Thickness-dependent nonlinear optical properties of CsPbBr₃ perovskite nanosheets, *Opt Lett*, 42 (2017) 3371-3374.
- Maciel G.S., Rakov N., de Araujo C.B., Lipovskii A.A. and Tagantsev D.K., "Optical limiting behavior of a glass-ceramic containing sodium niobate crystallites", *Appl Phys Lett*, 79: 584-586, (2001).
- Mayerhöfer, T. G., Pahlow, S., & Popp, J. (2020). The Bouguer- Beer- Lambert law: Shining light on the obscure. *ChemPhysChem*. doi:10.1002/cphc.202000464
- Middleton, W. E. K. (1961). *Pierre Bouguer's Optical Treatise on The Gradation of Light*. University of Toronto Press.
- Pankove, J. I. 1971. *Optical Process in Semiconductors*. Dover, New York, 34.
- P. Isik, A. Karatay, H.G. Yaglioglu, A. Elmali, U. Kurum, A. Ates, N. Gasanly, *Opt Commun*, 288 (2013), pp. 107-113.
- Peranantham, P., Jeyachandran, Y. L., Viswanathan, C., Praveena, N. N., Chitra, P. C., Mangalaraj, D. And Narayandass, Sa. K., "The effect of annealing on vacuum-evaporated copper selenide and indium telluride thin films", *Materials Characterization*, 58: 756-764 (2007).
- 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.
- S. M. Sze, *Semiconductor Devices Physics and Technology* (Wiley, New York, 1985).
- Segura, A., Bouvier, J., Andres, M. V., Manjon, F. J. and Munoz, V. 1997. Strong Optical Nonlinearities in Gallium and Indium Selenides Related to InterValance-Band Transitions Induced by Light Pulses. *Phys. Rev. B*. Vol. 56, pp.4075- 4084.
- Sutherland, R.L., McLean, D.G. and Kirkpatrick S. 2003. *Handbook of Nonlinear Optics*. New York Basel.
- T. Xia, D. J. Hagan, M. Sheik-Bahae, and E. W. Van Stryland, *Opt. Lett.* ... O. A. Marciano and J. Castillo, *Pure Appl. Opt.* 3, 339 (1994).

- Terhune, R. W., Maker, P. D. and Savage, C. M. 1962. Optical harmonic Generation in Calcite. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 8, pp.404-406.
- U. Kurum, M. Yüksek, H.G. Yaglioglu, A. Elmali, A. Ates, M. Karabulut, G.M. Mamedov, *J Appl Phys*, 108 (2010).
- 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.
- X. Zheng, R.Z. Chen, G. Shi, J.W. Zhang, Z.J. Xu, X.A. Cheng, T. Jiang, *Opt Lett*, 40 (2015), pp. 3480-3483.
- Yang, Z. & Hao, J. Recent progress in 2D layered III–VI semiconductors and their heterostructures for optoelectronic device applications. *Adv. Mater. Technol.* **4**, 1900108 (2019).
- Yüksek, M., Kürüm, U., Yaglioglu, 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.
- Z. Qinghua, F. Riccardo , W. Tao and G. Andres-Castellanos. 2019. InSe: a two-dimensional semiconductor with superior flexibility .*Nanoscale* 11(20) 9845-9850