

**TEK KATLI İNCE FİLMLEİN OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN SWANEPOEL MODELİ İLE
BELİRLENMESİ İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF A SWANEPOEL MODEL BASED
SOFTWARE FOR DETERMINATION OF THE
OPTICAL PROPERTIES OF SINGLE LAYER THIN
FILMS**

ÇAĞRI KÖSE

DOÇ. DR. ABDULLAH CEYLAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

ÇAĞRI KÖSE'nin hazırladığı "Tek katlı ince filmlerin optik özelliklerinin Swanepoel modeli ile belirlenmesi için yazılım geliştirilmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

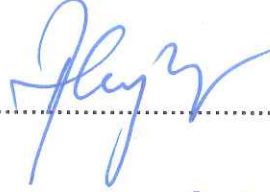
Prof. Dr. Semra İDE

Başkan



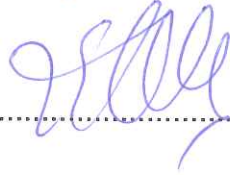
Doç. Dr. Abdullah CEYLAN

Danışman



Doç. Dr. Efe ESELLER

Üye



Doç. Dr. S. Şebnem ÇETİN

Üye



Yrd. Doç. Dr. Emre TAŞÇI

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI B EYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 20/07/2017 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (iç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

20 / 07 / 2017


Çağrı KÖSE

Güzel ve büyüyen aileme...

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/07/2017


ÇAĞRI KÖSE

ÖZET

TEK KATLI İNCE FİLMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN SWANEPHEL MODELİ İLE BELİRLENMESİ İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Çağrı KÖSE

Yüksek Lisans, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Ceylan

Temmuz 2017, 78 sayfa

İnce filmlerin dalga boyuna bağlı kompleks kırma indisi bilgisinin doğruluğu, hem araştırmacılar için hem de teknolojik açıdan oldukça önem taşımaktadır. Bu bilgi optik bant aralıkları (yarıiletkenler ve yalıtkanlar için), kusur seviyeleri, fonon ve plazma frekansları gibi bilgileri içermektedir. Ayrıca kırma indisi bilgisi güneş panelleri, girişim filtreleri ve ekran teknolojileri gibi optik cihazlar ve geniş bant / dar bant aralıklı optik kaplamalar ve akıllı camların modellenmesi ve dizaynı için de gerekmektedir. İnce filmlerin optik sabitlerinin hesaplanabilmesi, elde edilen verilerin bir veri tabanı oluşturularak saklanabilmesi ve bu veriler kullanılarak tasarımlar yapılabilmesi optik ve yüzey teknolojisi tabanlı çalışmalarda böyle bir önem taşırken, ülkemizde ince filmlerin optik karakterizasyonu için hazırlanmış yerli bir bilgisayar programının olmayışı, bu alanda çalışan araştırmacıları ve mühendisleri zorlamakta,

çalışmalarını yavaşlatmakta ve dışa bağlı kılmaktadır. Bu amaçla, ince filmlerin optik karakterizasyonu ve modellemesi yeteneklerine sahip bir program geliştirmenin ilk adımı olarak bu tez çalışmasında ince filmlerin, elektromanyetik spektrumun morötesi - görünür - yakın kızılötesi bölgesinde alınan optik geçirgenlik verilerinden optik sabitlerini ve kalınlıklarını, Swanepoel zarf metodunu temel alarak hesaplayan OPth programı geliştirilmiştir.

Zarf metodu sadece yüzeye dik gelen ışığın optik geçirgenlik spektrumu kullanılarak girişim saçaklarının maksimum ve minimum noktalarından çizilen zarf eğrisini kullanır ve boyutu yarı sonsuz veya belirli bir alttaş üzerine kaplanan tek katlı ince filmin kırma indisini, soğurma sabitini yüksek doğrulukla elde eder. Bu metot sadece sönüm katsayısının çok küçük olduğu zayıf soğurma bölgesinde geçerlidir ve alttaşın kırma indisinden farklı ince filmler için uygundur. Swanepoel yaptığı çalışmalarda alttaş boyutunun ve alttaş alt yüzeyinden çoklu yansıma katkılarını da göz önüne almıştır.

MATLAB programı ile geliştirilen OPth programının mevcut ticari yazılımlardaki kullanıcı arayüzünün ve veri giriş-çıkışının karmaşık yapısı gibi olumsuz yanlarının giderilmesi ile daha hızlı ve daha verimli çalışması hedeflenmiştir.

Geliştirilen programın test edilmesi amacı ile birçok ince filmin geçirgenlik verisi kullanılmış ancak literatür karşılaştırması için ZnS ve Ta₂O₅ ince filmlerin ve BK7 gibi cam alttaşların optik geçirgenlik ölçümleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen OPth programının çıktıları arasında ince filmlerin kompleks kırma indisi, soğurma sabiti, kalınlıkları ve optik bant aralıkları olacaktır.

Anahtar Kelimeler: ince film, optik, optik karakterizasyon, zarf metodu, Swanepoel metodu, program, OPth, kırma indisi, film kalınlığı, optik bant aralığı.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A SWANEPOEL MODEL BASED SOFTWARE FOR DETERMINATION OF THE OPTICAL PROPERTIES OF SINGLE LAYER THIN FILMS

Çağrı KÖSE

Master of Science, Physics Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Abdullah CEYLAN

July 2017, 78 pages

The accuracy of the complex refractive index information of thin films due to the wavelength is very important both for researchers and technologically. This information includes information such as optical band (for semiconductors and insulators), defect levels, phonon and plasma frequencies. In addition, refractive index information is also needed for modeling and designing of optical devices such as solar panels, interference filters and display technologies, and for broadband / narrowband optical coatings and intelligent glasses. The optical constants of thin films can be calculated, the obtained data can be stored in a database and designs can be made using these data, while such importance is given in optical and surface technology based studies, the absence of a domestic computer program for the optical

characterization of thin films in our country slows and foreign-dependent the work of researchers and engineers working in this area.

For this purpose, as the first step in developing a program with the optical characterization and modeling capabilities of thin films, the OPth program was developed to calculate the optical constants and thicknesses of thin films from the optical transmittance data obtained in the ultraviolet – visible - near infrared region of the electromagnetic spectrum, based on the Swanepoel envelope method.

The envelope method uses only the envelope curve drawn from the maximum and minimum points of the interference fringes using the optical transmission spectrum of the beam perpendicular to the surface, and obtains the refractive index and absorption coefficient of the single-layer thin film with high accuracy, which is coated on a semi-infinite or specific substrate. This method is only applicable to the weak absorption region where the extinction coefficient is very small and is suitable for refractive index of thin film is different from the substrate. Swanepoel has also taken into consideration the contributions of multiple reflections from the bottom surface of the substrate and substrate size.

Current commercial software has some disadvantages, such as the user interface and the complexity of the data input and output. The OPth program has been developed both for these problems and for faster and more efficient operation.

A lot of thin film transmittance data were used for the purpose of testing the developed OPth program, but optical transmittance measurements of ZnS and Ta₂O₅ thin films and glass substrate such as BK7 were used for literature comparison.

The output of the OPth program will have a complex refractive index, absorption coefficient, thickness and optical band gap of the thin films.

Keywords: thin film, optics, optical characterization, envelope method, Swanepoel method, programming, OPth, refractive index, film thickness, optical bandgap.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlanmama olanak sağlayan ve hem lisans hem yüksek lisans hayatımda hep desteğini hissettiğim değerli tez danışmanım Doç. Dr. Abdullah CEYLAN'a,

Karşılaştığım sorunlarda tecrübeleriyle destek olan, yardımlarını asla unutmayacağım değerli hocalarıma,

Grup çalışmasının ve yardımlaşmanın en iyi örneğini sergileyen değerli arkadaşlarım Elif Kübra ASAN, Gamze BAŞER ATAK, Selen DEMİREL, Emre GÜRSOY, Funda Elif ÇAĞDAŞ ve Baha BÖRÜ'ye,

Tezim için gereken desteği benden esirgemeyen Alp Eren Sinan ÖZHAN, Hacı BATMAN, Gülgün AYDOĞDU KURU ve Levent YAKA nezdinde tüm Aselsan Opto-Mekanik ekibine,

Motivasyon kaynağım çok değerli tüm dostlarıma,

Tüm desteğiyle her zaman koşulsuz yanımda olan başta annem olmak üzere tüm aileme,

Güzel eşim Nina'ya,

SONSUZ TEŞEKKÜRLER.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER	x
ÇİZELGELER	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Optik İnce Filmler	1
1.2. İnce Film Optiği	1
1.2.1. Maxwell Denklemleri	2
1.2.2. Dielektrik Duygunluk	3
1.2.3. Kompleks Kırma İndisi	4
1.2.4. Geçirgenlik, Yansıtma, Saçılma ve Soğurma	6
1.2.5. Yüzey ve Yapı Etkileri	13
1.3. İnce Film Optik Karakterizasyon Modelleri	19
1.4. Swanepoel Metodu	23
1.4.1. Transparan Bölge	27
1.4.2. Zayıf ve Orta Soğurma Bölgesi	28
1.4.3. Güçlü Soğurma Bölgesi	29
1.4.4. Optik Sabitlerin Hesaplanması	30
1.5. MatLab Programı	32
1.5.1. Matlab	32
1.5.2. Graphical User Interface	32
2. LİTERATÜR TARAMASI	34
2.1. Zarf Eğrilerinin Çizdirilmesi	34
2.2. Optik Sabitlerin Hesaplanması	36

2.2.1. Soğurma Sabiti (α) ve Sönüm Katsayısı (k)	36
2.2.2. Optik Bant Aralığı (E_g)	37
3. OPth PROGRAMI	38
3.1. Programın Hazırlanması	38
3.2. Programın Kullanımı	41
4. BULGULAR	57
4.1. ZnS Filmler	57
4.1.1. Kırma İndisi (n)	60
4.1.2. Sönüm Katsayısı (k)	61
4.1.3. Kalınlık (d) ve Optik Bant Aralığı (E_g)	61
4.2. Ta ₂ O ₅ Filmler	64
4.2.1. Kırma İndisi (n)	65
4.2.2. Sönüm Katsayısı (k)	66
4.2.3. Kalınlık (d) ve Optik Bant Aralığı (E_g)	66
5. SONUÇ	68
KAYNAKLAR	71
EKLER	75
A. ZnS Filmlerin Optik Sabitleri	75
B. Ta ₂ O ₅ Filmin Optik Sabitleri	77
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİLLER

Sayfa

- Şekil 1.1 Geçen ışın (T), yansıyan ışın (R), saçılan ışın (S) ve soğurulan ışın (A) için şematik bir gösterim. 6
- Şekil 1.2 Elektrik alan vektörlerinin, geliş düzlemi içine girmesi durumunda gelen, iletilen ve yansıyan dalgaların alan vektörleri (P-polarize). 9
- Şekil 1.3 Bir alttaş üzerine kaplanmış ince film yapısında çoklu yansıma ve geçirgenliklerin şematik gösterimi.11
- Şekil 1.4 Filmdeki tek bir döngü için faz farkını hesaplamada kullanılan geometrik gösterim.12
- Şekil 1.5 Farklı sıcaklıklarda a) 200°C b) 300°C c) 350°C d) 400°C e) 450°C f) 500°C tavllanmış WO₃ ince filmlerin AFM görüntüleri [13].14
- Şekil 1.6 IBD tekniğiyle oda sıcaklığında kaplanan Cu filmlerin kaplama enerjisine karşı ortalama karekök pürüzlülük değerleri [14].15
- Şekil 1.7 Farklı BIAS değerlerinde PIAD yöntemi ile kaplanmış TiO₂ filmlerin TEM kesit alanı görüntüleri. Soldan sağa BIAS değerleri 80 V, 100 V, 120 V ve 140 V 'tur. Kesit alanı görüntülerinin üzerindeki desenler, elektron kırınım desenleridir [5].15
- Şekil 1.8 Gözenekli bir titanyum dioksit tabakasının gözenekliliğe bağlı kırma indisi değerlerinin simülasyonu. Gözenekler boş (n = 1) olarak kabul edilmiştir. (-) gösterimi L=0 ve iğne benzeri gözeneklerin eksenine paralel elektrik alana; (-.) gösterimi L=1'e karşılık gelir; (- -) gösterimi L=0.5'e ve titanyum dioksit içindeki iğne benzeri gözenek eksenine dik elektrik alana; (..) gösterimi L=0.5 ve iğne şeklindeki titanyum dioksit sütunlarının eksenine dik elektrik alana karşılık gelir [5].16

Şekil 1.9 215 nm kalınlığındaki PIAD yöntemi ile kaplanmış HfO ₂ filmin TEM görüntüsü (120 V BIAS gerilimi, 0.4 nm/s kaplama hızı, 250 °C kaplama sıcaklığı, 15 sccm oksijen akış hızı) [5].....	17
Şekil 1.12 Çift ışın demetli geçirgenlik spektrofotometresinin şematik gösterimi [17].	18
Şekil 1.13 Popüler yansıtma spektrofotometresi yardımcı donanımlarında ışın demeti yollarının şematik gösterimi [17].	18
Şekil 1.14 Cam alttaş üzerine biriktirilmiş filme normal geliş açısı ile gelen ışık ışını.....	24
Şekil 1.15 Bir alttaş üzerine biriktirilen ince filme normalden farklı bir açıyla gelen ışık ışınının tipik davranışının şematik gösterimi.....	24
Şekil 1.16 Örnek bir ince filme ve alttaşa ait geçirgenlik spektrumu [25].	25
Şekil 1.17 Örnek bir filmin geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	27
Şekil 1.18 Filmin hesaplanan kırma indisi ve üzerine uygulanan Cauchy fiti.	30
Şekil 1.19 Film kalınlığını bulmak için çizdirilen 1/2'ye karşı n/λ grafiği.	31
Şekil 1.20 Örnek GUI arayüzü.	33
Şekil 2.1 Tauc tarafında geliştirilen yöntem ile optik bant aralığının bulunması.....	37
Şekil 3.1 OPth programı arayüzü.	38
Şekil 3.2 OPth programının akış şeması.	40
Şekil 3.3 Alttaşın geçirgenlik verisinin girilmesi.	41
Şekil 3.4 Alttaş geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.....	41
Şekil 3.5 Filmin geçirgenlik verisini girilmesi.	42

Şekil 3.6 Film geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.....	42
Şekil 3.7 Girdi dosya isimleri ve RUN butonunun açılması.....	43
Şekil 3.8 Film ve alttaş verileri arasında uyumsuzluk olduğunda OPth programının verdiği uyarı mesajı.	44
Şekil 3.9 Geçirgenlik verilerinin çizdirilmesi.	44
Şekil 3.10 Veri karşılaştırma kutucuğunun aktif edilmesi.	45
Şekil 3.11 Karşılaştırılacak filmin geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.	45
Şekil 3.12 Karakterizasyon işlemine başlanması.....	46
Şekil 3.13 Karakterizasyon işleminin bitmesi ile bulunan film kalınlığı ve aktif olan butonlar.....	47
Şekil 3.14 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı kırma indisi grafiğinin çizdirilmesi.....	48
Şekil 3.15 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı hesaplanan ve karşılaştırılan filmlerin kırma indisi grafiklerinin birlikte çizdirilmesi.	48
Şekil 3.16 Arayüz üzerindeki tabloda dalga boyuna karşı kırma indisi değerlerinin gösterilmesi.	49
Şekil 3.17 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı film geçirgenlik eğrisi ile birlikte zarf eğrilerinin çizdirilmesi.....	50
Şekil 3.18 Arayüz üzerindeki tabloda dalga boyuna karşı film geçirgenlik eğrisi ile birlikte zarf eğrisi değerlerinin gösterilmesi.	50
Şekil 3.19 Optik bant aralığı hesabı için malzemeye ait bant geçişi seçimi.	51
Şekil 3.20 Malzemeye ait optik bant aralığı değerinin arayüz üzerinde gösterilmesi.	52
Şekil 3.21 Elde edilen verilerin .txt dosyası olarak kaydedilmesi.	52

Şekil 3.22 Elde edilen verilerin kaydedileceği dosya adının verilmesi. ...	53
Şekil 3.23 Karakterizasyonda kullanılan ve elde edilen verilerin grafiklerini dışa aktarma butonu.....	53
Şekil 3.24 Alttaş ve filme ait geçirgenlik spektrumu.....	54
Şekil 3.25 Filme ait geçirgenlik spektrumu ve etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	54
Şekil 3.26 Filme ait dalga boyuna karşı kırma indisi grafiği.	55
Şekil 3.27 Filme ait dalga boyuna karşı sönüm katsayısı grafiği.....	55
Şekil 3.28 Filme ait dalga boyuna karşı soğurma katsayısı grafiği.	56
Şekil 4.1 ZnS-A örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	58
Şekil 4.2 ZnS-B örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	58
Şekil 4.3 ZnS-C örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	59
Şekil 4.4 ZnS-D örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	59
Şekil 4.5 ZnS-E örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	60
Şekil 4.6 ZnS örnekler için OPth programından elde edilen kırma indisi değerlerinin.....	60
Şekil 4.7 ZnS örnekler için OPth programından elde edilen sönüm katsayısı değerlerinin grafiği.	61
Şekil 4.8 ZnS-A örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	62

Şekil 4.9 ZnS-B örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	63
Şekil 4.10 ZnS-C örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	63
Şekil 4.11 ZnS-D örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	64
Şekil 4.12 ZnS-E örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	64
Şekil 4.13 BK7 alttaş ve Ta ₂ O ₅ ince filme ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri.	65
Şekil 4.14 Ta ₂ O ₅ örnek için OPth programı ve Macleod programından elde edilen kırma indisi değeri grafiği.	65
Şekil 4.15 Ta ₂ O ₅ örnek için OPth programı ve Macleod programından elde edilen sönüm katsayısı değeri grafiği.	66
Şekil 4.16 Ta ₂ O ₅ örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.	67

ÇİZELGELER

Çizelge 4.1 ZnS örneklerin büyütme koşulları	57
Çizelge 4.2 Farklı özelliklerde büyütülen ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen kalınlık değerleri.....	62
Çizelge 4.3 Farklı özelliklerde büyütülen ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen optik bant aralığı değerleri.	62
Çizelge A.1 ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen kırma indisi değerleri.....	75
Çizelge A.2 ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen sönüm katsayısı değerleri.....	76
Çizelge B.1 Ta ₂ O ₅ örnek için OPth ve Macleod programları ile elde edilen kırma indisi ve sönüm katsayısı değerleri	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Elektriksel alan vektörü
H	Manyetik alan vektörü
D	Elektriksel yer değiştirme vektörü
B	Manyetik indüksiyon vektörü
P	Polarizasyon
M	Mıknatıslanma
ϵ_0	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
μ_0	Serbest uzayın manyetik geçirgenliği
χ	Lineer dielektrik duygunluk
ω	Işığın frekansı
$\epsilon(\omega)$	Dielektrik fonksiyon
c	Işığın boşluktaki hızı
k	Dalga vektörü
v_{faz}	Faz hızı
I	Dalganın şiddeti
ν	Dalga sayısı
λ	Boşluktaki dalga boyu
n	Kırma indisi
k	Sönüm katsayısı
α	Soğurma katsayısı
T	Optik geçirgenlik
R	Optik yansıma
S	Optik saçılma
A	Optik soğurma
r	Yansıtma katsayısı
t	Geçirgenlik katsayısı

G	Ters örgü vektörü
N	Birim hacimdeki elektron sayısı
q_e	Elektronun yükü
m_e	Elektronun kütlesi
ω_0	Rezonans frekansı
γ_f	Sönüm sabiti
ω_p	Plazma frekansı
x	Soğurma
d	Kalınlık
E_g	Optik bant aralığı

Kısaltmalar

PIAD	Plasma ion assisted deposition / Plazma iyon destekli kaplama
BIAS	Besleme gerilimi
APS	Advanced plasma source / Gelişmiş plazma kaynağı
TEM	Transmission electron microscopy / Geçirmeli elektron mikroskobu
EBE	Electron beam evaporation / Elektron demeti ile buharlaştırma
DIBS	Dual ion beam sputtering / İkili iyon demeti ile saçtırma

1. GİRİŞ

1.1. Optik İnce Filmler

Günümüzde optik ince filmler, ışığın yönlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Mimari camlardaki düşük emisyonlu kaplamalardan [1] gözlük camlarındaki yansıtma kaplamalara [2], cerrahi uygulamalardaki elektrot kaplamalarından [3] askeri aviyonik ve ticari baş üstü göstergelere [4], sanal gerçeklikten güneş pillerine kadar birçok teknolojinin altında optik ekipmanlar ve optik kaplamalar yer almaktadır. Teknolojik gelişmelerle paralel olarak bu optik ekipmanların yapısı giderek karmaşık hale gelmektedir. Optik cihazlardan istenen performansı elde edebilmek için özel olarak hazırlanan ince film katmanların tasarımı, uygulamalı optik konusunda oldukça önemli hale gelmektedir.

Amaca yönelik optik modelleme yapmadan önce, kullanılacak malzemelerin optik özelliklerini bilmek, kaplama süreçlerini çok daha hızlı ve pratik yürütülmesini sağlayacaktır. Fakat ince filmlerin optik özellikleri, klasik optik, elektrodinamik, katı hal fiziği ve kuantum mekaniği alanlarının kesiştiği disiplinler arası bir araştırma ve geliştirme alanı oluşturmaktadır. Bu çok yönlülük optik kaplamalar araştırma konusunu daha zor anlaşılır hale getirmektedir [5].

1.2. İnce Film Optiği

İnce filmlerin dalga boyuna bağlı optik sabitlerinin ve kalınlıklarının doğru olarak hesaplanması hem temel bilgi açısından hem de teknolojik gelişmeler açısından çok önemlidir. Kırma indisinde küçük bir fark bile ince film kaplanmış optik bileşenlerin spektral tepkisinde (yansıma ve geçirgenlik) ciddi değişiklikler meydana getirebildiğinden, kompleks kırma indisi ve kalınlık hesaplarının doğruluğu optik bileşenlerin başarılı bir şekilde üretilmesi ile direkt ilgilidir [6][7]. Hesaplanacak bu parametreler sayesinde optik enerji bant aralığı, kusur seviyeleri, fonon

ve plazma frekansları gibi temel bilgilere ulaşılabilir [8]. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için önce ışığın doğasına ve madde ile etkileşimine göz atmak gerekir.

1.2.1. Maxwell Denklemleri

Işığın doğasını anlamak için Maxwell denklemlerinin boşluktaki (serbest yüklerin ve serbest akım yoğunluğunun olmadığı) formunu incelersek konuyu hem klasik hem de yarı klasik yaklaşımla ele almış oluruz. Bu yaklaşım, birçok soruna çözüm getirebildiğinden bu çalışma için de yeterli olacaktır [9].

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (1.1a)$$

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.1b)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (1.1c)$$

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}. \quad (1.1d)$$

Burada, \mathbf{E} ve \mathbf{H} , elektriksel ve manyetik alanların vektörlerini temsil ederken, \mathbf{D} ve \mathbf{B} elektriksel yer değiştirme ve manyetik indüksiyon vektörlerini göstermektedir. \mathbf{P} polarizasyon ve \mathbf{M} mıknatıslanmadır. Eşitlik 1.1' de ne serbest yük taşıyıcı yoğunluğu ne de serbest akım yoğunluğu mevcut değildir.

Ortamin mıknatıslanmasının olmadığı ($\mathbf{M} = 0$) ve her doğrultu ve yönde aynı tepkiyi verdiği (izotropik olduğu) varsayımı yapılırsa, Maxwell denklemlerinden aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \mathbf{E}) - \Delta \mathbf{E}$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right),$$

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) &= -\mu_0 \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \mathbf{H})}{\partial t}, \\ \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) &= \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \mathbf{E}) - \Delta \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (1.2)$$

Burada elektrik alan vektörü \mathbf{E} ve elektriksel yer değiştirme \mathbf{D} vektörü arasındaki ilişkiyi bilmek gerekmektedir [9].

1.2.2. Dielektrik Duygunluk

Bir dielektrik malzemenin elektrik alan içerisine konuğunda malzemenin kutuplanmış hale geleceği bilinmektedir ve bu etkinin ölçüsü olarak birim hacim başına tanımlanan dipol moment olarak adlandırılan \mathbf{P} polarizasyonu (kutuplanma) kullanılmaktadır. Polarizasyonun elektrik alan ile bağıntısı da şu şekilde verilmektedir;

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}. \quad (1.3)$$

Burada χ dielektrik duygunluk olarak tanımlanmaktadır [10].

Elektrik alanın zamana göre salınımlar gerçekleştirdiği düşünöldüğünde;

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (1.4)$$

dielektrik duygunluk da $\chi(\omega)$ formunda, frekansa bağımlı bir profil çizmektedir .

Bu eşitliğe uyan ortamlarda:

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{D} &= \varepsilon_0 [1 + \chi(\omega)] \mathbf{E} \equiv \varepsilon_0 \varepsilon(\omega) \mathbf{E}\end{aligned}\quad (1.5)$$

eşitlikleri geçerlidir. Burada elektrik alan vektörü ile elektriksel yer değiştirme vektörü arasındaki ilişki görölebilmektedir.

Bu sonuç ile dielektrik fonksiyon $\varepsilon(\omega)$ için;

$$\varepsilon(\omega) \equiv 1 + \chi(\omega) \quad (1.6)$$

tanımı yapılmaktadır [9].

1.2.3. Kompleks Kırma İndisi

Bir ortamdaki soğurma ve ortamdaki yansıma, kompleks kırma indisi (\tilde{n}) olarak bilinen tek bir değer ile belirlenebilir. Kompleks kırma indisi şu şekilde verilir;

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) \equiv \sqrt{\varepsilon(\omega)} \quad (1.7)$$

Gerçek kısmı, sıradan kırma indisidir ve sanal kısmı k (sönüm katsayısı) dalganın sönümlenmesinden sorumludur.

İncelemeyi elektrik alanların harmonik salınımlarıyla sınırlandırıldığımızdan, Eşitlik 1.2' ye geri döndüğümüzde, elektriksel yer değiştirme vektörünün zamana göre ikinci türevini, vektörün $-\omega^2$ ile çarpımı ile değiştirebiliriz. Eşitlik 1.5' i de kullanarak şunu elde ederiz;

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) &= -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 (\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})}{\partial t^2} \right) \\ &= -\mu_0 \left(\frac{\partial^2 (\varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi \mathbf{E})}{\partial t^2} \right) \\ &= -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} (1 + \chi(\omega)) \\ \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \mathbf{E}) - \frac{\varepsilon(\omega) \omega^2}{c^2} \mathbf{E} &= 0 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Denklemdaki c ışığın boşluktaki hızı olarak tanımlanmaktadır ve

$$\mu_0 \varepsilon_0 = c^{-2}$$

eşitliği kullanılmaktadır.

Burada serbest yüklerin olmadığı düşünüldüğünden elektrik alanın ıraksaması sifira eşit olur ve varsaydığımız izotropi nedeniyle, elektrik alan vektörünü skaler alan ile değiştirebiliriz [9];

$$\Delta E + \frac{\varepsilon(\omega)\omega^2}{c^2} E = 0 \quad (1.10)$$

Elektromanyetik dalganın z doğrultusunda ilerlediğini varsayarsak çözüm önerimiz;

$$E(z, t) = E_0 e^{-i(\omega t - kz)}$$

şeklinde olur. Burada k ışığın dalga vektörüdür ve elektrik alanının bu çözümü

$$k = \frac{\tilde{n}\omega}{c} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \quad (1.11)$$

sağlandığı zaman var olur. Çözüm önerisinde Eşitlik 1.11' i kullanırsak şu elde edilir;

$$E = E_0 e^{-\frac{\omega}{c}kz} e^{i(\frac{\omega}{c}nz - \omega t)} \quad (1.12)$$

Bu eşitlik, $k \neq 0$ durumunda dalganın genliğinin üstel biçimde azaldığını gösterir. Ayrıca kırma indisinin gerçek kısmı

$$v = \frac{c}{n}$$

şeklinde verilen dalga cephesinin faz hızını tanımlar.

Eşitlik 1.12' ye dönüldüğünde dalganın genliği olarak;

$$E = E_0 e^{-\frac{\omega}{c}kz} \quad (1.13)$$

Dalganın I şiddeti, alan genlik modülünün karesi ile orantılı olduğu için, şiddet ortamın içinde sönümlenir;

$$I = I(z = 0) e^{-2\frac{\omega}{c}kz} \equiv I(z = 0) e^{-\alpha z} \quad (1.14)$$

Sönümlü bir ortamda ilerleyen bir dalga için bu ışık şiddetinin üstel sönümü, soğurmanın Lambert yasası (Eşitlik 1.14) olarak bilinir ve soğurma katsayısı α' nın frekans ya da dalga sayısı bağımlılığı şu şekilde verilir;

$$\alpha(\omega) = 2\frac{\omega}{c}k(\omega). \quad (1.15)$$

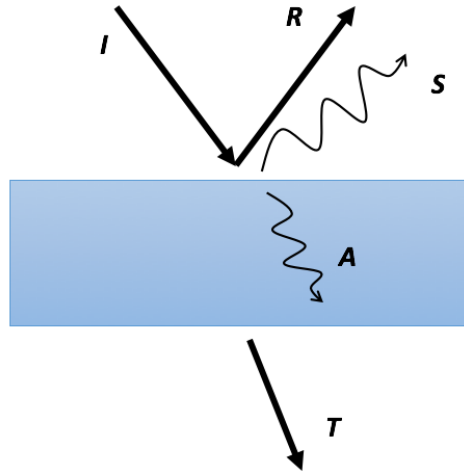
$$\nu \equiv \frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c}$$

$$\alpha(\nu) = 4\pi\nu k(\nu). \quad (1.16)$$

Kırma indisi n ve sönüm katsayısı k boyutsuz olsalar da, soğurma katsayısı α uzunluğun tersi birimlerde verilir. Kırma indisi n ve sönüm katsayısı k çifti, bir malzemenin doğrusal optik sabitleri çiftini oluşturur [9] [11].

1.2.4. Geçirgenlik, Yansıtma, Saçılma ve Soğurma

Işığın malzeme ile etkileşimine baktığımızda, Şekil 1.1' de gösterilen sistemi düşünerek bazı önemli tanımlar yapabiliriz.



Şekil 1.1 Geçen ışın (T), yansıyan ışın (R), saçılan ışın (S) ve soğurulan ışın (A) için şematik bir gösterim.

Işık malzeme yüzeyine geldikten sonra çeşitli şekillerde davranabilir;

- Örnek üzerinden iletilebilir (belirli bir yönde) ki bu optik geçirgenlik (T) dediğimiz olgudur, geçen ışığın şiddetinin (I_T) gelen ışığın şiddetine (I_E) oranı olarak tanımlanır;

$$T \equiv \frac{I_T}{I_E}, \quad (1.17)$$

- Örnekten yansiyabilir, bu optik yansıma (R) olarak adlandırılır, tek yönde yansıyan ışığın şiddetinin (I_R) gelen ışığın şiddetine oranı olarak tanımlanır;

$$R \equiv \frac{I_R}{I_E}, \quad (1.18)$$

- Örnek yüzeylerinden veya hacminden dağınık olarak saçılabilir. Gerçekte gelen ışık şiddetinin bir kısmı dağınık saçılmaya uğrar ve optik saçılma (S) olarak adlandırılan bu durum, saçılan ışık şiddetinin (I_S) gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır;

$$S \equiv \frac{I_S}{I_E}, \quad (1.19)$$

- Örnek yüzeylerinde veya hacminde soğurulabilir ve buna da optik soğurma (A) denilir, soğurulan ışık şiddetinin (I_A) gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır;

$$A \equiv \frac{I_A}{I_E}. \quad (1.20)$$

Saçılma ve soğurmanın olduğu durumlarda enerji korunumu;

$$T + R + A + S = 1 \quad (1.21)$$

şeklinde yazılır [9].

İnce filmlerin geçirgenlik ve yansıtma hesapları, optik ince film uygulamalarında en çok ihtiyaç duyulan işlemlerden biridir ve bu hesapları etkileyen bazı başka parametreler vardır.

Bir ince film sistemi düşündüğümüzde, elektromanyetik dalga önce ince film yüzeyi ile etkileşir. Bu nedenle, ince film spektrumlarını anlamamanın ilk adımı, elektromanyetik dalganın yüzeylerdeki ve ara yüzeylerdeki davranışını anlamaktır. Bu ihtiyaç, Fresnel denklemlerini incelemeyi gerektirir.

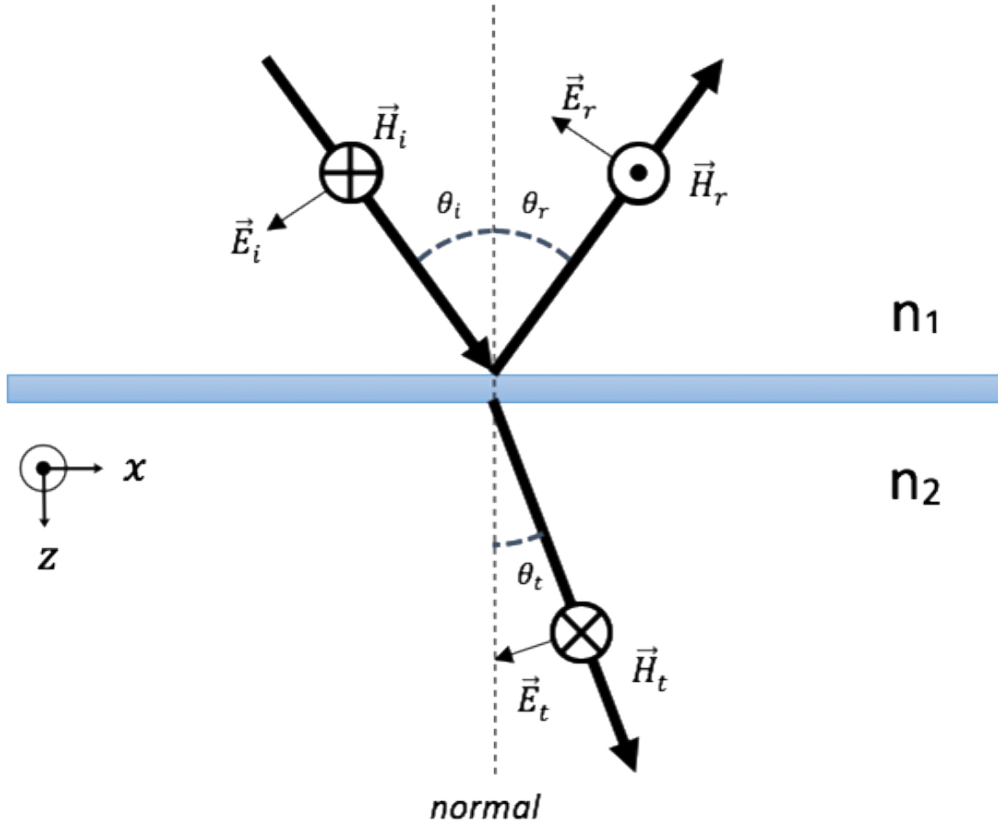
Fresnel denklemleri, ışığın, farklı kırma indislerine sahip iki ortam arasındaki bir arayüze geldiği zaman ilerleyen ve yansıyan

elektromanyetik dalganın davranışını özetler. Fresnel denklemleri, Maxwell denklemleri ile tamamen uyumludur ve bu denklemler klasik optiğin en temel denklemleri arasındadır [12].

Fresnel denklemlerini türetmek için, Şekil 1.2' de gösterildiği gibi, bir arayüz ile ayrılmış iki optik ortam düşünülür. Arayüz normaline göre θ_i açısı ile arayüze doğru ilerleyen dalganın elektrik alan genliği E_i ile verilir. Arayüze çarpması durumunda, bu dalganın bir kısmı iletilecek ve bir kısmı yansıtılacaktır. İletilen dalga θ_t açısı ile yayılır ve θ_t Snell yasası ile bulunur;

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_2}{n_1} . \quad (1.22)$$

Burada n_1 ve n_2 iki farklı ortama ait kırma indisleridir. Yansıyan dalganın açısı θ_r , yansıma yasasına göre θ_i ' ye eşittir. İletilen ve yansıyan bu iki dalganın genliklerini sırasıyla E_t ve E_r olarak verilir. Fresnel denklemlerinde amaç bu genliklerin belirlenmesidir.



Şekil 1.2 Elektrik alan vektörlerinin, geliş düzlemi içine girmesi durumunda gelen, iletilen ve yansıyan dalgaların alan vektörleri (P-polarize).

Bunu başarmak için, farklı özelliklere sahip iki ortam arasındaki arayüzde elektrik ve manyetik alanlar için sınır koşulları uygulanır. Elektrik alanının (\vec{E}) ve manyetik alanın (\vec{H}) yüzeye teğet olan bileşenleri, sınır boyunca sürekli olmalıdır. \vec{E} , \vec{H} ve \vec{k} vektörleri her dalga için sağ el kuralına uyması gerektiğinden, tüm alan vektörlerinin yönleri, Şekil 1.2' de gösterildiği gibi tanımlanır.

Daha sonra elektrik alan için sınır durumu;

$$E_i \cos \theta_i + E_r \cos \theta_r = E_t \cos \theta_t . \quad (1.23)$$

Üç dalganın hepsinde aynı doğrultuda olan manyetik alan için bu durum şu şekilde ifade edilir;

$$H_i - H_r = H_t . \quad (1.24)$$

Bu denklemleri çözmek için, her bir dalganın elektrik ve manyetik alan genlikleri arasındaki ilişkiyi birleştirilmelidir;

$$H = \sqrt{\varepsilon/\mu} E. \quad (1.25)$$

Malzemenin kırma indisi de sınır durumu denklemlerine eklenirse;

$$\begin{aligned} H_{i,r} &= n_1 E_{i,r} / \mu_1 c \\ H_t &= n_2 E_t / \mu_2 c \end{aligned} \quad (1.26)$$

denklemlerini elde edilir. Eşitlik 1.24' ten;

$$n_1(E_i - E_r) / \mu_1 = n_2 E_t / \mu_2 \quad (1.27)$$

elde edilir. Eşitlik 1.23 ve Eşitlik 1.27 birleştirilirse Şekil 1.2' deki P-polarize dalga için Fresnel denklemleri elde edilir;

$$r_p = \frac{(n_1/\mu_1) \cos \theta_t - (n_2/\mu_2) \cos \theta_i}{(n_1/\mu_1) \cos \theta_t + (n_2/\mu_2) \cos \theta_i} \quad (1.28)$$

$$t_p = \frac{2(n_1/\mu_1) \cos \theta_i}{(n_1/\mu_1) \cos \theta_t + (n_2/\mu_2) \cos \theta_i} . \quad (1.29)$$

Burada yansıma ve geçirgenlik katsayılarını tanımlanır;

$$\begin{aligned} r &= \frac{E_r}{E_i} \\ t &= \frac{E_t}{E_i} . \end{aligned} \quad (1.30)$$

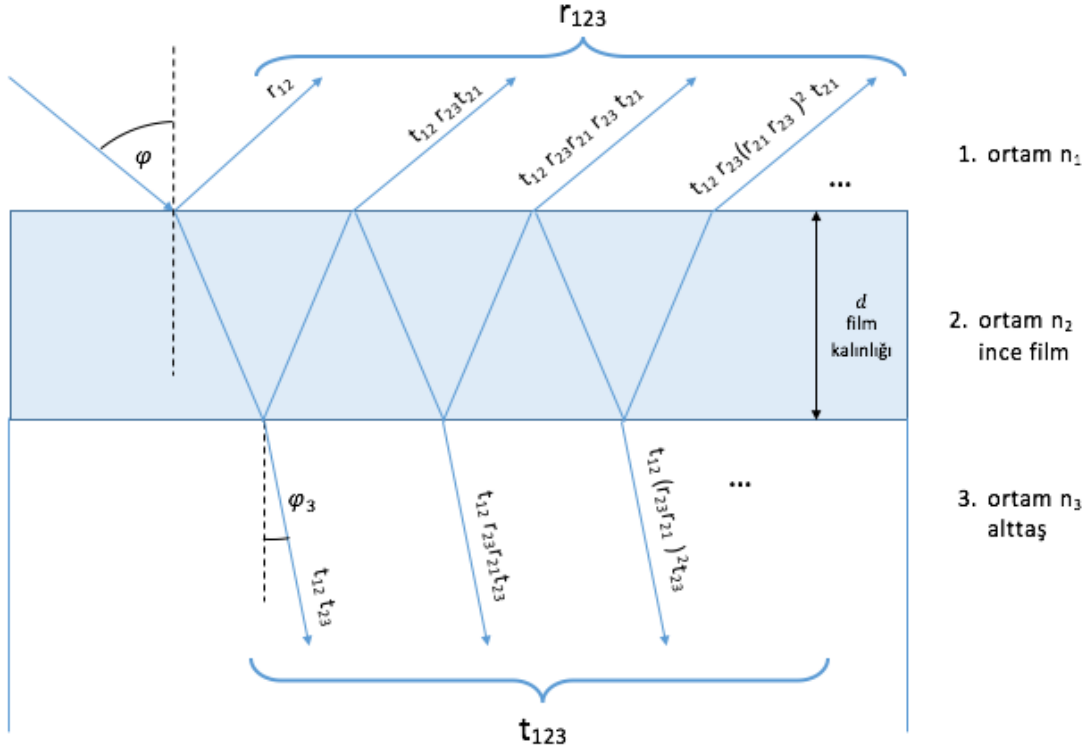
Sıklıkla kullanılan optik malzemeler manyetik değildir, bu nedenle $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım altında, Eşitlik 1.28 ve 1.29' u Snell yasası ile birleştirerek Fresnel denklemleri daha da basitleştirilebilir [12];

$$r_p = -\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (1.31)$$

$$t_p = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (1.32)$$

Fresnel denklemleri ile iki ortam arasındaki bir ince filmin geçirgenlik ve yansıtma oranı hesaplanabilir. Bu hesaplamalar yapılırken ince filmin kalınlığının birkaç mikrometreden daha küçük olduğunu ve birinci ortam ile üçüncü ortamın birbirinden farklı kırma indisine sahip olduğunu düşünmek gerekir. Böyle bir sistem Şekil 1.3' te verilmektedir.

Sistemin geçirgenlik ve yansıtma oranının hesaplanmasında Fresnel denklemlerinde kullanılan geçirgenlik ve yansıtma katsayıları kullanılır. Genel olarak, bu katsayılar kompleksdir ve hem genlik hem de faz hakkında bilgi taşırlar. Ayrıca ışık tabaka içinden geçtiğinde, faz kazanır.



Şekil 1.3 Bir alttaş üzerine kaplanmış ince film yapısında çoklu yansıtma ve geçirgenliklerin şematik gösterimi.

İnce film tabakasındaki her döngü için (muhtemelen karmaşık) faz farkı 2δ olursa, önceki çıkarımlara karşılık olarak, geçirgenlik katsayısı t_{123} ve karşılık gelen yansıtma katsayısı r_{123} için aşağıdaki ifadeleri elde edilir;

$$r_{123} = r_{12} + t_{12}r_{23}t_{21}e^{2i\delta}(1 + r_{21}r_{23}e^{2i\delta} + \dots)$$

$$= r_{12} + \frac{t_{12}r_{23}t_{21}e^{2i\delta}}{1-r_{21}r_{23}e^{2i\delta}} . \quad (1.33)$$

$$t_{123} = t_{12}e^{i\delta}t_{23} \left[1 + r_{12}r_{23}e^{2i\delta} + (r_{21}r_{23}e^{2i\delta})^2 + \dots \right]$$

$$= \frac{t_{12}t_{23}e^{i\delta}}{1-r_{21}r_{23}e^{2i\delta}} . \quad (1.34)$$

Film penetrasyonu gereğince, Eşitlik 1.10' dan elde edilen dalga fonksiyonu $e^{i\delta}$ faktörü ile çarpılır.

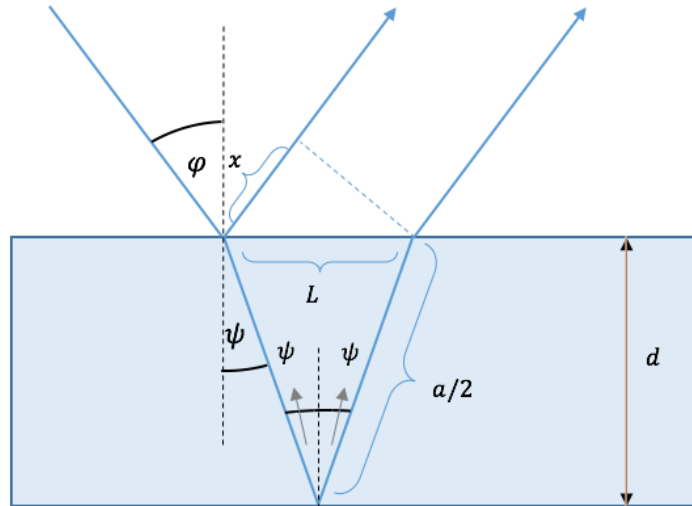
Yine Eşitlik 1.28 ve 1.29' da $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ varsayımı kullanılırsa ve

$$t_{12}t_{21} = 1 - r_{12}^2$$

ifadesinin eldesi ile Eşitlik 1.33 için şu ifade yazılabilir;

$$r_{123} = \frac{r_{12} + r_{23}e^{2i\delta}}{1 - r_{21}r_{23}e^{2i\delta}} . \quad (1.35)$$

Ancak bu denklemlerle çalışabilmek için faz farkı için de bir ifade elde etmek gerekir. Şekil 1.4' te basit geometrik yaklaşımla bunu elde edebiliriz.



Şekil 1.4 Filmdeki tek bir döngü için faz farkını hesaplamada kullanılan geometrik gösterim.

Sistem, geometriyi kullanmak için $n_1 = 1$ durumuna kısıtlanarak ve filmin sönümsüz olduğu varsayılarak (kırma indisinin gerçek kısmı ile) δ ifadesi için Şekil 1.4' te verilen ifadeler kullanılarak;

$$\cos \psi = \frac{d}{a/2}, \sin \varphi = \frac{x}{L}, \tan \psi = \frac{L/2}{d}$$

$$2\delta = 2\pi v(n_2 a - x)$$

$$\delta = \pi v \left(\frac{2n_2 d}{\cos \psi} - \frac{2d}{\cos \psi} \sin \psi \sin \varphi \right)$$

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi}{n_2}, n_2 \cos \psi = n_2 \sqrt{1 - \sin^2 \psi}$$

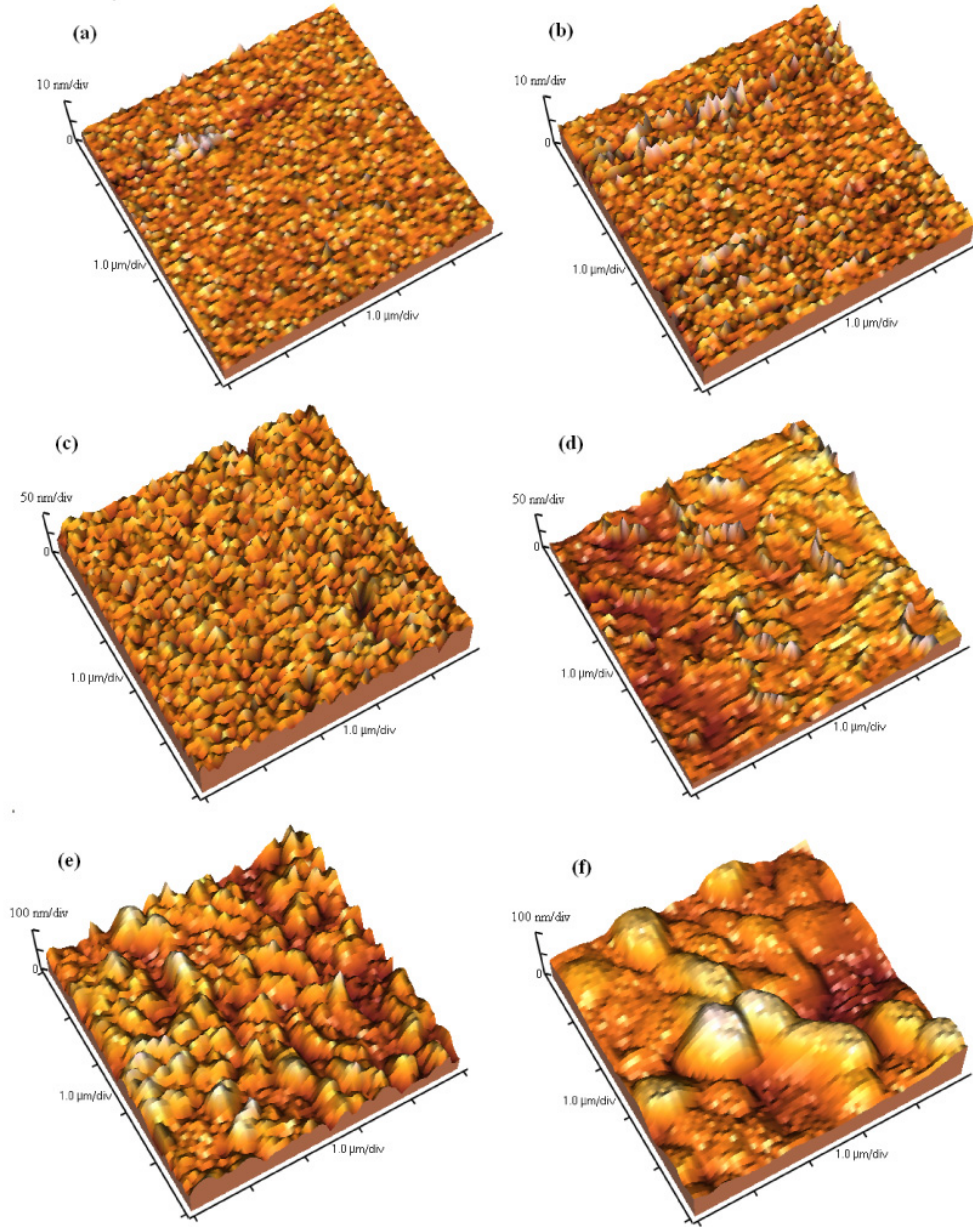
$$\delta = 2\pi v d \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \varphi} \quad (1.36)$$

eşitliği elde edilir. Kompleks kırma indisi için, δ 'da kompleks hale gelir ve faz faktörü $e^{i\delta}$ film içerisinde dalganın sönümlenmesini açıklar [9].

Bu denklemlerden de anlaşılacağı gibi, ışık ışınının ince film yüzeyine gelme açısı ve film kalınlığı, filmin geçirgenlik ve yansıtma özelliklerini doğrudan etkiler.

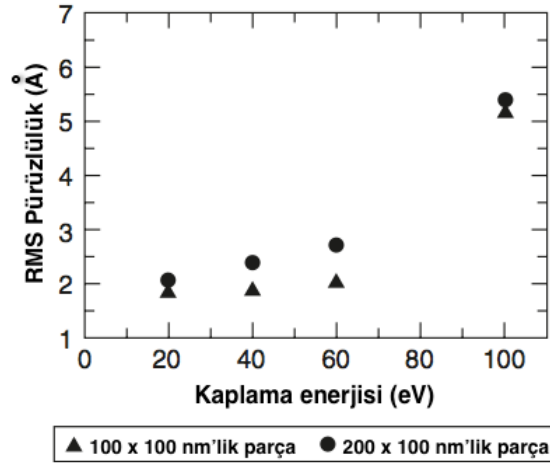
1.2.5. Yüzey ve Yapı Etkileri

Işığın madde ile etkileşimi ve Fresnel denklemleri için kullandığımız tüm şematik gösterimlerde, iki farklı ortam arasında kalan arayüzeylerin pürüzsüz olduğu koşulları inceledik. Şekil 1.5 bu konuda çok daha farklı yaklaşımlara ihtiyacımız olduğunu bize gösterir.



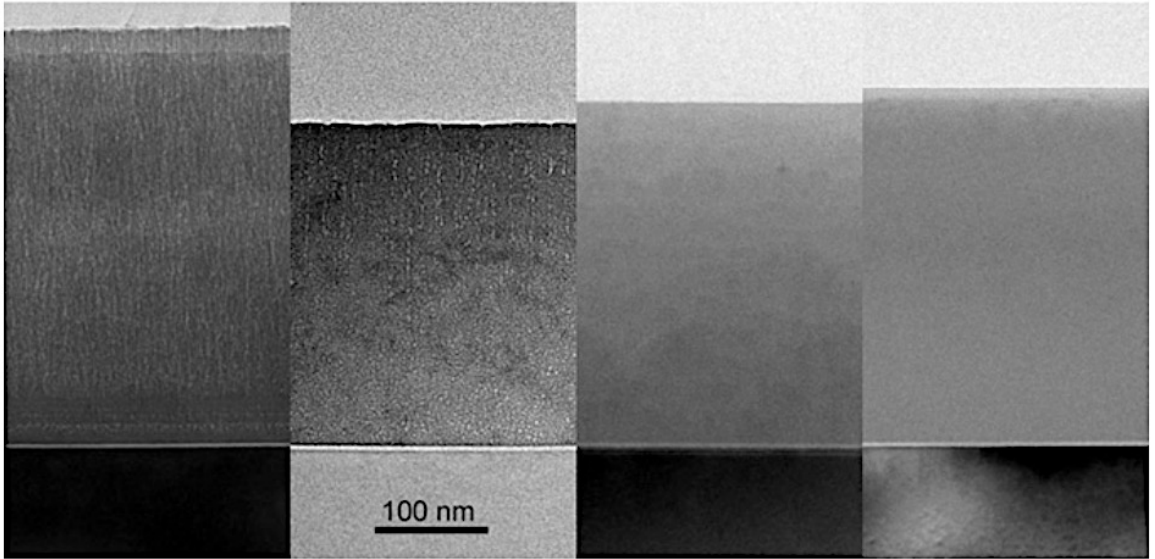
Şekil 1.5 Farklı sıcaklıklarda a) 200°C b) 300°C c) 350°C d) 400°C e) 450°C f) 500°C tavlanmış WO_3 ince filmlerin AFM görüntüleri [13].

Şekil 1.5' te de görüldüğü gibi film yüzeyleri her zaman pürüzsüz olmaz ve yüzey pürüzlülüğü, kaplama teknikleri ve koşulları ile doğrudan ilgilidir. Şekil 1.6' da verilen, kaplama işleminin enerjisine karşı ortalama karekök (rms) pürüzlülük değeri grafiği de bunu vurgular.



Şekil 1.6 IBD tekniğiyle oda sıcaklığında kaplanan Cu filmlerin kaplama enerjisine karşı ortalama karekök pürüzlülük değerleri [14].

Pürüzlülük, ışık madde etkileşimini de doğrudan etkiler. Placido ve Meng tarafından yapılan çalışmada [14], aynı kalınlıkta fakat farklı pürüzlülük değerlerine sahip iki film için farklı geçirgenlik değerleri bulunmuştur.

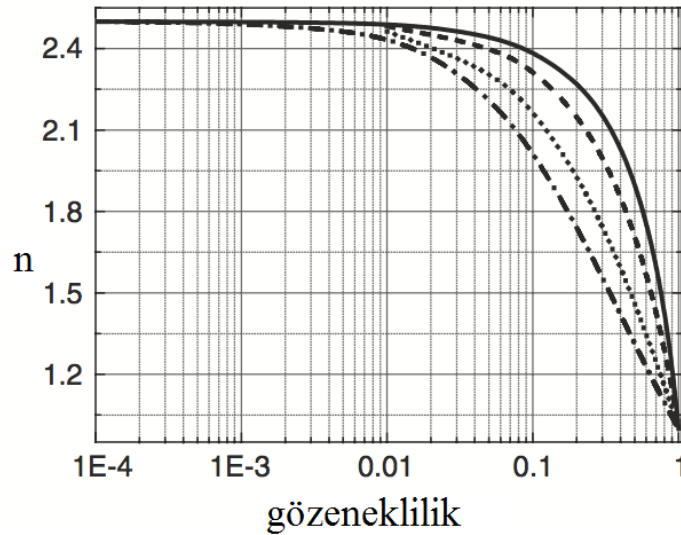


Şekil 1.7 Farklı BIAS değerlerinde PIAD yöntemi ile kaplanmış TiO_2 filmlerin TEM kesit alanı görüntüleri. Soldan sağa BIAS değerleri 80 V, 100 V, 120 V ve 140 V 'tur. Kesit alanı görüntülerinin üzerindeki desenler, elektron kırınım desenleridir [5].

Düşük alttaş sıcaklıklarında, Plazma İyon Destekli Kaplama (Plasma Ion Assisted Deposition / PIAD) tekniği ile farklı besleme gerilimlerinde

(BIAS) ve Gelişmiş Plazma Kaynağı (Advanced Plasma Source / APS) yardımı ile büyütülmüş titanyum dioksit tabakalarının Şekil 1.7' de verilen TEM kesit alanı görüntülerine baktığımızda, film katman kalitesinin kaplama koşullarına bağlılığı görülebilir. Besleme gerilimi arttıkça gözenekler ve yüzey pürüzlülüğü azalır [5].

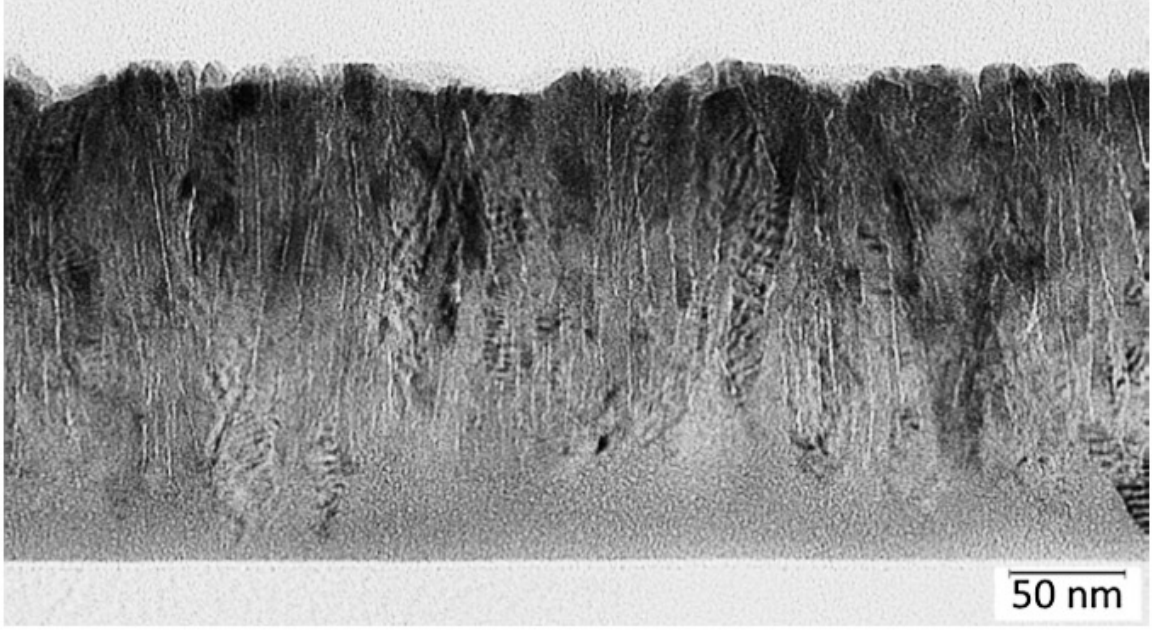
Gözenekli yapının, filmlerin optik özelliklerine etkisini incelemek istediğimizde Şekil 1.8' de titanyum dioksit ince film için verilen kırma indisi grafiği güzel bir örnektir. Kırma indisi değerlerindeki farklılık, gözeneklilik (gözenekli kesimin hacim doldurma faktörü) ve depolarizasyon faktörü olarak kabul edilen L' den kaynaklanmaktadır.



Şekil 1.8 Gözenekli bir titanyum dioksit tabakasının gözenekliliğe bağlı kırma indisi değerlerinin simülasyonu. Gözenekler boş ($n = 1$) olarak kabul edilmiştir. (-) gösterimi $L=0$ ve iğne benzeri gözeneklerin eksenine paralel elektrik alana; (-.) gösterimi $L=1$ 'e karşılık gelir; (--) gösterimi $L=0.5$ 'e ve titanyum dioksit içindeki iğne benzeri gözenek eksenine dik elektrik alana; (..) gösterimi $L=0.5$ ve iğne şeklindeki titanyum dioksit sütunlarının eksenine dik elektrik alana karşılık gelir [5].

Gözeneklilik ve filmdeki kristal ve amorf kesimlerin birlikte bulunması optik homojensizliğe neden olabilir. Şekil 1.9' da gösterildiği gibi, alttaşa yakın bölgede amorf bir yapı, sonrasında gözenekli bir polikristal film

yapısı olan bir hafniyum dioksit film katmanında genellikle kırma indisinde değişime neden olur [5].



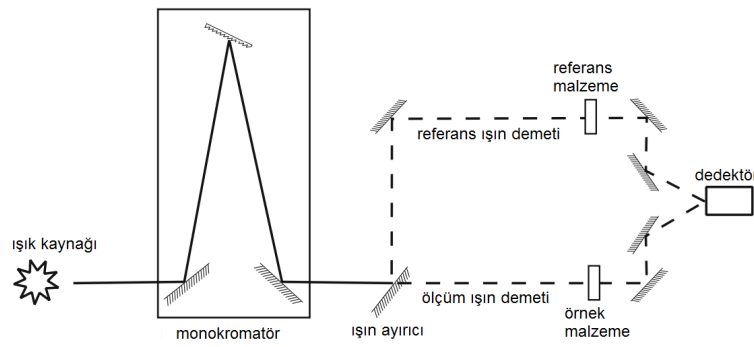
Şekil 1.9 215 nm kalınlığındaki PIAD yöntemi ile kaplanmış HfO_2 filmin TEM görüntüsü (120 V BIAS gerilimi, 0.4 nm/s kaplama hızı, 250 °C kaplama sıcaklığı, 15 sccm oksijen akış hızı) [5].

Optik parametrelerin ve film kalınlıklarının belirlenmesi genelde elipsometrik ve spektrofotometrik analiz vasıtasıyla yapılmaktadır. Elipsometrik yöntem özellikle de spektroskopik elipsometre, ince filmlerin ve alttaşların optik sabitlerini bulmak için çok güçlü bir tekniktir [15]. Mikroelektronik endüstrisinde [16], yarı iletken katmanlarda tek katlı kalın oksit tabakalarının analizi için yaygın bir kullanım bulmuştur. Tekniğin gücü, aşırı yüzey hassasiyetinden gelmektedir. Bu, aynı zamanda bu tekniğin zayıf noktasıdır da; ince film üzerindeki çok küçük bir kirli alan film için oldukça farklı optik sabitler oluşturabilmektedir. Elipsometrik ölçümlerin analizinde, incelenen katman sisteminin dikkatli bir şekilde modellenmesi kesinlikle iyi sonuçlar verebilmektedir. Elipsometrenin karmaşık doğası ve yüksek maliyeti nedeniyle, daha kolay temin edilebilir ve uygun fiyatlı spektrofotometre dikkate değer bir ilgi çekmiştir.

Spektrofotometre ile gerçekleştirilebilen geçirgenlik ölçümleri, en basit ölçüm modelidir ve hemen hemen tüm spektrofotometreler, geçirgenlik ölçümleri yapabilir. Bir örnekte, gelen ışığın bilinen (P_0) gücünden ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ne kadarının geçtiği ölçülür. Yüzde olarak ifade edilmek istenirse;

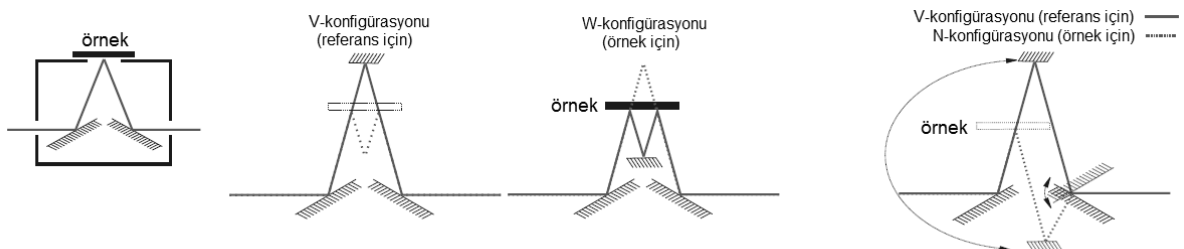
$$T = \frac{P_T}{P_0} \times 100 \quad (1.59)$$

şeklinde verilebilir. Burada P_T numuneden geçen ışığın gücü ve T geçirgenliktir [17]. Şekil 1.12' de optik geçirgenlik ölçümü için ayarlanmış bir spektrofotometrenin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 1.10 Çift ışın demetli geçirgenlik spektrofotometresinin şematik gösterimi [17].

Spektrofotometrelerin sıklıkla çalıştırıldığı bir diğer kullanım modu yansıtma ölçümüdür. Bu ölçümler için sistemin çalışması, ışın yollarının dedektöre ulaşan ışığın numune tarafından yansıtılan ışık olacak şekilde değiştirilmesi haricinde, geçirgenlik ölçümü ile çok benzerdir. Şekil 1.13' te bazı yansıtma ölçümü düzenekleri için örnek gösterimler mevcuttur.



Şekil 1.11 Popüler yansıtma spektrofotometresi yardımcı donanımlarında ışın demeti yollarının şematik gösterimi [17].

1.3. İnce Film Optik Karakterizasyon Modelleri

İnce filmlerin kırma indisinin hesaplanması için kullanılan birçok yöntem vardır. Spektrofotometre ile yapılan normal açıda geçirgenlik ve normale yakın yansıtma ölçümlerine ait verileri kullanarak n ve k hesabı yapılması bunlardan biridir. Ancak bu yöntemin, yansıma verisini yeterince doğru elde etmek ve film üzerinden tam olarak aynı noktada geçirgenlik ve yansıtma ölçümü almak gibi zorlu yönleri vardır. Film mükemmel homojen bileşimde ve kalınlıkta değilse, yöntemin doğruluğu azalacaktır [8].

Yaygın olarak kullanılan diğer yöntemler de, dalga boyuna bağlı kompleks kırma indisi için ampirik dağılım denklemleri ve bantlar arası geçişler, serbest elektron modeli veya klasik osilatör modeli gibi fizik tabanlı modellerdir. Bu yaklaşımlar, ince film optik tasarımı ve analizi için birkaç farklı ticari yazılım paketinde de kullanılmaktadır (TfCalc [18] ve Filmwizard [19]). Sıklıkla kullanılan modeller şunlardır;

Cauchy modeli: Bu denklemler tamamen ampiriktir ve ilk olarak Cauchy tarafından önerilmiştir (1789-1827). SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄ ve BK7 alttaş gibi saydam filmleri ve alttaşları modellemek için oldukça sık kullanılmaktadır [20];

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} + \dots \quad (1.37a)$$

$$k(\lambda) = A_k + \frac{B_k}{\lambda^2} + \frac{C_k}{\lambda^4} + \dots \quad (1.37b)$$

Burada dalga boyları mikron cinsinden ifade edilmektedir. A_n , B_n , C_n , A_k , B_k ve C_k fit parametreleridir. Çoğu zaman, serilerin genişletilmesi ilk iki terimden sonra sona erer ve λ^{-4} terimleri kullanılmaz [8].

Sellmeier modeli: Bu denklemler ilk olarak Sellmeier tarafından (1871) türetilmiştir. Cauchy formülleri gibi saydam malzemeler için uygun olmakla birlikte, Si, Ge, GaAs gibi yarıiletkenler için de kızılötesi bölgede

uygulanabilmektedir. Sellmeier denklemleri, Cauchy formüllerinin genelleştirilmiş halidir:

$$n(\lambda) = \left(A_n + \frac{B_n \lambda^2}{\lambda^2 - C_n^2} \right)^{1/2} \quad (1.38a)$$

$$k(\lambda) = \left[n(\lambda) \left(B_1 \lambda + \frac{B_2}{\lambda} + \frac{B_3}{\lambda^3} \right) \right]^{-1} \quad (1.38b)$$

Burada A_n , B_n , C_n , B_1 , B_2 ve B_3 fit parametreleridir [8].

Lorentz klasik osilatör modeli: Lorentz klasik osilatör teorisi, ışık ile madde arasındaki klasik etkileşim teorisine dayanır ve bağlı yükten dolayı meydana gelen kutuplanmayı tanımlamak için kullanılır. Lorentz klasik osilatör dağılım formülü, çekirdeği çeken bir elektrik alan tarafından yönlendirilen, çekirdekteki bağlı bir elektronun hareket denkleminin çözümünden gelir:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\epsilon_0 m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (1.39)$$

Burada N birim hacimdeki elektron sayısını, q_e elektronun yükünü, ϵ_0 serbest uzayın geçirgenliğini, m_e elektronun kütlesini, ω_0 rezonans frekansını ve ω ışığın frekansını belirtmektedir [21].

Drude modeli: Drude'un öne sürdüğü (1900) bu model, maddenin hareketsiz pozitif iyonları ve etkileşime girmeyen bir elektron gazı olduğunu varsayan, metaldeki elektronların kinetik teorisine dayanmaktadır. Bu basit model klasik serbest elektron teorisini kullanmaktadır:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \gamma_f^2)} \quad (1.40)$$

Burada γ_f sönüm sabiti, $\omega_p = (Nq_e^2/\epsilon_0 m_e)^{1/2}$ olmak üzere plazma frekansıdır [22].

Tauc-Lorentz modeli: Amorf malzemelerin, bant içi soğurma bölgesinde optik sabitlerinin uygun şekilde fit edilebilmesi için geliştirilmiştir [5]:

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{AE_0C(E-E_g)^2}{(E^2-E_0^2)^2 + C^2E^2} \frac{\Theta(E-E_g)}{E} \quad (1.41)$$

Burada $\Theta(E)$ yoğunluk fonksiyonu ($\Theta(E) = 1$ eğer $E \geq 0$ ise ve $\Theta(E) = 0$ eğer $E < 0$ ise) olmakla birlikte E_g enerji bant aralığı, E_0 rezonans enerjisi, C genişleme faktörü ve A ise optik geçiş matrisinin elemanlarını temsil eden bir parametredir [23].

Forouhi-Bloomer modeli: Bu model, Kramers-Kronig integrallerinden elde edilen optik dağılım modellerinden biridir ve ilk etapta amorf yarı iletkenlere ve dielektrik malzemelere uygulanmıştır [24]:

$$n(E) = n_\infty + \frac{B_0E+C_0}{E^2-BE+C} \quad (1.42a)$$

$$k(E) = \frac{A(E-E_g)^2}{E^2-BE+C} \quad (1.42b)$$

Bu denklemden, A , B ve C malzemenin elektronik konfigürasyonu ile ilgili fit parametreleridir. E_g enerji bant aralığını ve n_∞ yüksek enerjilerdeki kırma indisi değerini belirtmektedir. B_0 ve C_0 sabitleri ise A , B , C ve E_g parametrelerine bağlıdır.

Bu dispersiyon modellerinin hepsi, kullanıcıya, içerdiği kırma indisi dağılımının doğası hakkında bazı varsayımlar yapmasını gerektirir. Bu, sıklıkla kullanılan birçok malzeme için bir problem değildir, ancak yeni materyallerin (çok fazlı, yerleşmiş soğurma bantları, olağandışı bant kenarı soğurması vb. özellikleri olan) yer aldığı araştırmalar için zor olacaktır. Bu sebeple varsayım yapılmayan yöntemler oldukça büyük öneme sahiptirler:

Kramers-Kronig eşitlikleri: Klasik osilatör modelinin matematiksel eşitlikleri kırma indisi ile soğurma katsayılarının bağımsız parametreler

olmadıklarını, birbirleri ile ilişkili olduklarını göstermektedir. Nedensellik yasasını devreye sokar ve kompleks sayı analizini uygularsak, kırma indisinin reel ve sanal kısımları arasındaki bağıntıları çıkarabiliriz:

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega' \quad (1.43a)$$

$$k(\omega) = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(\omega') - 1}{\omega' - \omega} d\omega' \quad (1.43b)$$

Burada P Cauchy integralinin ana kısmını alacağımızı gösterir [11].

Swanepoel (Zarf) metodu: 1976'da Manifacier ve arkadaşları [6] optik sabitleri optik geçirgenlik spektrumlarından hesaplayabilmek için akıllıca bir yol sunmuştur. Bu yöntem, Swanepoel [25] tarafından geliştirilmiş ve ticari ince film yazılımına da yön vermiştir [26][27]. Yöntem, gözle görülür girişim saçakları gösteren herhangi bir geçirgenlik spektrumu için geçerlidir. Geçirgenlik spektrumunun maksimum (T_M) ve minimumları (T_m) çevresinde zarf eğrileri oluşturulur. Kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) artık her dalga boyunda maksimum ve minimum zarf eğrilerinden hesaplanabilir.

Swanepoel metodu, diğer karakterizasyon modellerine göre;

- Sadece filmin ve alttaşın geçirgenlik ölçümlerinin karakterizasyon için yeterli olması,
- Sadece ampirik bir model değildir, ölçüm verileri üzerinden işlem yapması,
- Fizik tabanlı modeller gibi hesaplanması gereken çok fazla parametreye sahip olmaması gibi avantajlara sahiptir.

Zarf yöntemi son derece kullanışlı ve çok basittir ancak dikkat edilmesi gereken birkaç nokta vardır:

- Girişim maksimum ve minimumları arasındaki zarfları oluşturmak için 'doğru yol' olarak tanımlanacak tek bir yol yoktur. Genellikle, parabolik interpolasyon yöntemi kullanılır, ancak farklı yöntemler de kullanılabilir.

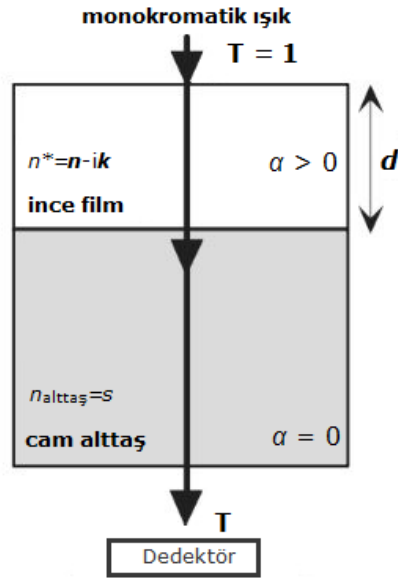
- Zarf eğrileri oluşturulurken, anlık artış veya azalışları değil, geçirgenlik eğrisinin maksimum ve minimum noktaları dikkate alınmalıdır.
- Film çok kalın değilse, yani soğurma bantları girişim saçakları arasına girerse, yöntem yerel soğurma özelliklerini hesaba katan bir performans gösteremez.
- Metodun doğruluğu, film kalınlığının azalmasıyla birlikte azalır; yani düşük film kalınlıklarında, maksimum ve minimum noktaların arası daha da açılır ve bu noktalar arasındaki interpolasyon zorlaşır.
- Filmdeki soğurma çok yüksek olduğu zaman girişim saçakları görünmez ve alt ve üst zarf eğrileri çakışırsa yöntem başarısız olur. Orijinal çalışmada [25], yöntem daha sonra Cauchy dispersiyon bağıntısı ile fit edilir. Dikkatle uygulandığında, zarf yöntemi rutin bir analiz tekniği olarak uygulanabilir.

1.4. Swanepoel Metodu

Swanepoel metodunda, şeffaf bir cam veya transparan bir alttaş üzerinde büyütülen tek katlı ince filmin optik sabitleri, filmin geçirgenlik eğrisi incelenerek bulunabilmektedir. Heavens'ın kitabı [28] da ince filmlerin optik özellikleri konusunda klasik bir referans konumundadır ve hangi çalışmaların yapılabileceğini açıkça tarif eder. Kitap, çoklu yansımaların varlığında ince filmlerde yansıma ve geçirgenlik için birçok çıkarımdan bahseder.

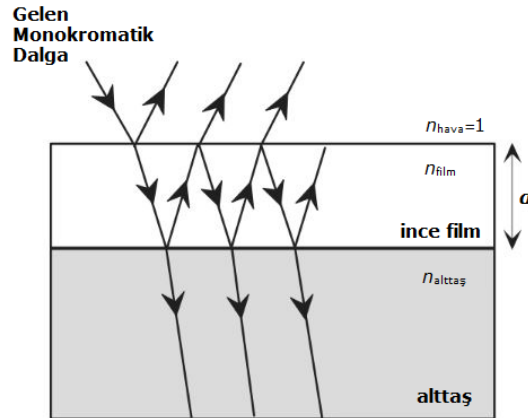
Transparan bir alttaş üzerinde bir ince filmin şematik gösterimi Şekil 1.14' te verilmiştir. Film kalınlığı d ve kompleks kırma indisi $\tilde{n} = n - ik'$ dir. Burada n kırma indisi ve k , Eşitlik 1.47g ile α soğurma katsayısı üzerinden elde edilebilen sönüm katsayısıdır. Optik geçirgenliği çok yüksek olan saydam alttaş, film kalınlığı d' den birkaç kat büyüklükte bir kalınlığa sahiptir. Alttaşın kırma indisi s ve soğurma katsayısı $\alpha = 0'$ dir. İnce filmi ve alttaşı çevreleyen havanın kırma indisi $n_{hava} = 1'$ dir. Doğru

bir analiz için, geçirgenliği (T) hesaplarken üç arayüzdeki tüm çoklu yansımalar hesaba katılmalıdır.



Şekil 1.12 Cam alttaş üzerine büyütülmüş filme normal geliş açısı ile gelen ışık ışını.

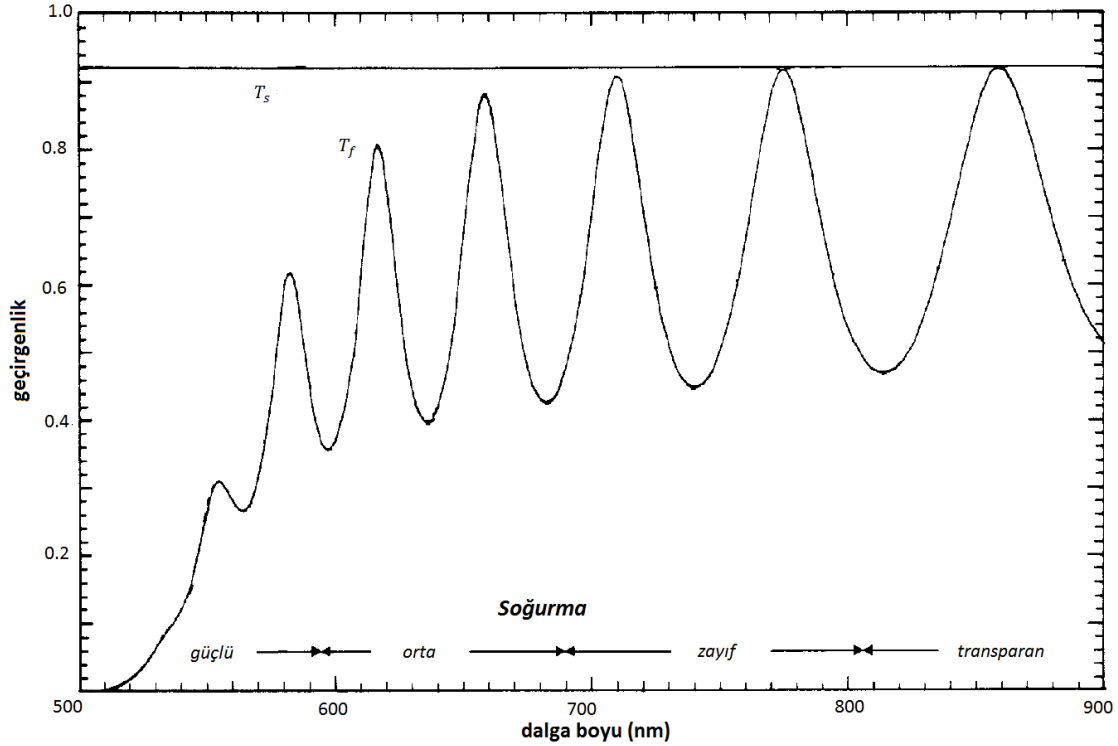
Genel olarak bir ince filmden geçen ışık miktarı, ışık yolu boyunca gerçekleşen yansıma ve soğurma miktarına bağlıdır. Eğer ince film orta dereceli soğurma katsayısına (α) sahipse, o zaman Şekil 1.15' te gösterildiği gibi örneğin iletilen tarafında birden çok girişim olacaktır.



Şekil 1.13 Bir alttaş üzerine biriktirilen ince filme normalden farklı bir açıyla gelen ışık ışınının tipik davranışının şematik gösterimi.

Geçirgenlik spektrumu Şekil 1.14' deki gibi kabaca dört bölgeye ayrılabilir. Transparan bölgede $\alpha = 0$ ve iletim, n ve s tarafından çoklu

yansımalar yoluyla belirlenir. Zayıf soğurmanın olduğu bölgede α küçüktür fakat geçirgenliği azaltmaya başlar. Orta derecede soğurmanın olduğu bölgede α büyüktür ve geçirgenlik esas olarak α' nın etkisi ile azalır. Güçlü soğurma bölgesinde, geçirgenlik α' nın etkisiyle neredeyse tamamen azalır.



Şekil 1.14 Örnek bir ince filme ve alttaşa ait geçirgenlik spektrumu [25].

Eğer filmin d kalınlığı filmin her yerinde aynı ise girişim etkileri Şekil 1.14' de görülen bir spektruma neden olur. Oluşan bu saçaklar, filmin optik sabitlerini hesaplamak için Swanepoel modelinin temellerini oluşturur.

Sadece kalın bir alttaşın varlığı göz önüne alınırsa, girişimsiz geçirgenlik iyi bilinen "Eşitlik 1.44a" ile verilir:

$$T_s = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} \quad (1.44a)$$

ve burada

$$R = \left[\frac{(s-1)}{(s+1)} \right]^2 \quad (1.44b)$$

veya

$$T_s = \frac{2s}{s^2+1} \quad (1.44c)$$

buradan da

$$s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\left(\frac{1}{T_s^2} - 1\right)} \quad (1.44d)$$

elde edilir.

Girişim saçakları için temel denklem;

$$2nd = m\lambda \quad (1.45)$$

Burada m , maksimumlar için bir tam sayı ve minimumlar için bir yarım tam sayıdır. Eşitlik 1.45, n ve d' nin çarpımı hakkında bilgi içerir ancak sadece bu denklemi kullanarak ayrı ayrı n veya d hakkında bilgi edinmek mümkün değildir.

Şekil 1.14' deki T geçirgenlik eğrisi Eşitlik 1.46 ile verilen karmaşık denklem ile ifade edilir:

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \varphi + Dx^2} \quad (1.46)$$

$$A = 16n^2s \quad (1.47a)$$

$$B = (n + 1)^3(n + s^2) \quad (1.47b)$$

$$C = 2(n^2 - 1)(n^2 - s^2) \quad (1.47c)$$

$$D = (n^2 - 1)^3(n - s^2) \quad (1.47d)$$

$$\varphi = 4\pi nd/\lambda \quad (1.47e)$$

$$x = e^{-\alpha d} \quad (1.47f)$$

$$\alpha = 4\pi k/\lambda \quad (1.47g)$$

Burada verilen x soğurma olarak adlandırılır. Eşitliklerde yer alan n , s ve α dalga boyunun fonksiyonu olarak verilir.

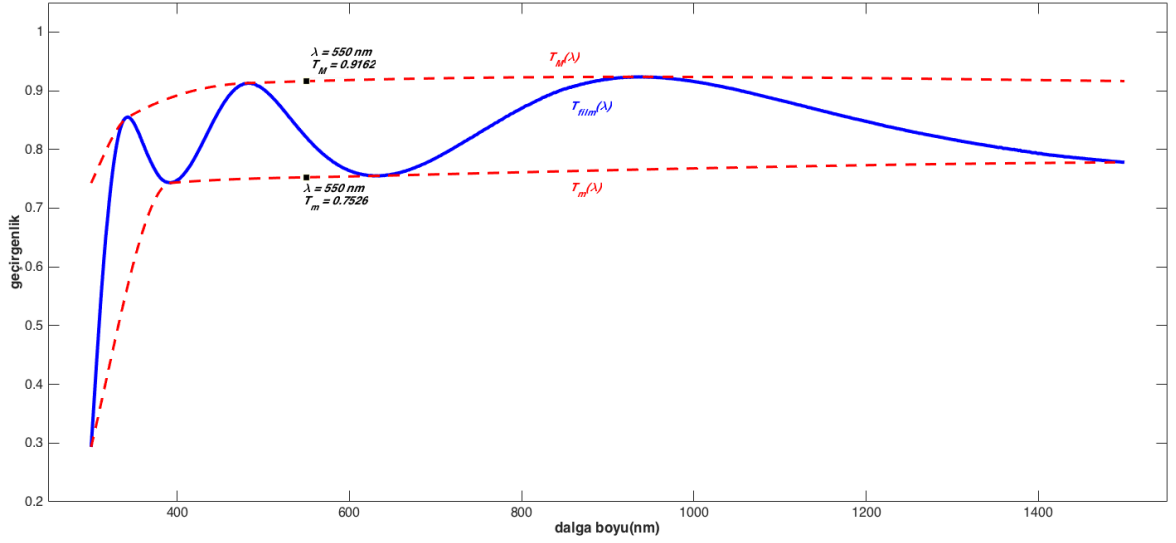
Girişim saçaklarının ekstrem noktaları için:

$$T_M = \frac{Ax}{B-Cx+Dx^2} \quad (1.48a)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B+Cx+Dx^2} \quad (1.48b)$$

denklemleri kullanılır.

Daha fazla analiz için T_M ve T_m zarfları, Şekil 1.17' de gösterildiği gibi λ' nin sürekli fonksiyonları olarak çizdirilmelidir ve herhangi bir T_M değeri için karşılık gelen bir T_m değeri olmalıdır.



Şekil 1.15 Örnek bir filmin geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri.

Bu metodu önemli ve kullanışlı kılan şey, denklemlerin uygulanması ile birlikte önemli optik özelliklerin saptanabilmesidir.

1.4.1. Transparan Bölge

Transparan bölgede $\alpha = 0$ veya $x = 1'$ dir ve bu değerler Eşitlik 1.48a' da yerine yazılırsa:

$$T_M = \frac{2s}{s^2+1} \quad (1.49)$$

elde edilir.

Eşitlik 1.49, Eşitlik 1.44c ile aynıdır ve transparan bölgede girişim saçaklarının maksimum değeri yalnızca s' in bir fonksiyonudur ve T_s ile aynıdır. T_M' nin, T_s' den farklılık göstermesi soğurmanın başladığını

gösterir. Eşitlik 1.49' dan yola çıkarak Eşitlik 1.44d ile transparan bölgede s için hesaplama yapılabilir.

Eşitlik 1.47' yi, $x = 1$ için Eşitlik 1.48b' nin içine koyduğumuzda:

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4+n^2(s^2+1)+s^2} \quad (1.50)$$

veya

$$n = \sqrt{M + \sqrt{M^2 - s^2}} \quad (1.51)$$

$$M = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2+1}{2}$$

elde edilir.

1.4.2. Zayıf ve Orta Soğurma Bölgesi

Bu bölgede $\alpha \neq 0$ ve $x < 1$ 'dir. Eşitlik 1.48a' nın Eşitlik 1.48b' den çıkarılması ile x' den bağımsız bir ifade elde edilir:

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2C}{A} \quad (1.52)$$

Eşitlik 1.47' deki değerleri Eşitlik 1.52' de yerine koyarsak:

$$n = \sqrt{N + \sqrt{N^2 - s^2}} \quad (1.53)$$

elde edilir. Burada

$$N = 2s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{s^2+1}{2}$$

ile ifade edilir. Eşitlik 1.53 dalga boyuna bağlı n değerini T_m ve T_M üzerinden hesaplanabilmesini sağlar.

Dalga boyuna bağlı kırma indisi değeri, $n(\lambda)$ elde edildikten sonra Eşitlik 1.47' deki tüm sabitler bulunabilir ve x farklı şekillerde hesaplanabilir. Eşitlik 1.48a' nın çözümü ile

$$x = \frac{E_M - \left[E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (1.54)$$

$$E_M = \frac{8n^2s}{T_M} + (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

elde edilir.

Eşitlik 1.48b' nin çözümü ile

$$x = \frac{E_m - \left[E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{1/2}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (1.55)$$

$$E_m = \frac{8n^2s}{T_m} - (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

elde edilir.

Manificier ve arkadaşları [6] sonsuz alttaş için bir teori kullanarak, x için bir denklem türetmişlerdir:

$$x = \frac{(n+1)(n+s) \left[\sqrt{T_M/T_m - 1} \right]}{(n-1)(n-s) \left[\sqrt{T_M/T_m + 1} \right]} \quad (1.56)$$

1.4.3. Güçlü Soğurma Bölgesi

Güçlü soğurma bölgesinde, girişim saçakları kaybolur. Bu bölgede yalnızca geçirgenlik spektrumundan n ve x' i bağımsız olarak hesaplamak için herhangi bir yol yoktur. Kıрма indisinin değerleri, spektrumun diğer kısımlarında hesaplanan değerlerin ekstrapolasyonu ile tahmin edilebilir. Girişim etkileri göz ardı edilirse, $x \ll 1$ için Eşitlik 1.56 şu şekilde yazılabilir:

$$T_0 \approx Ax/B$$

ve

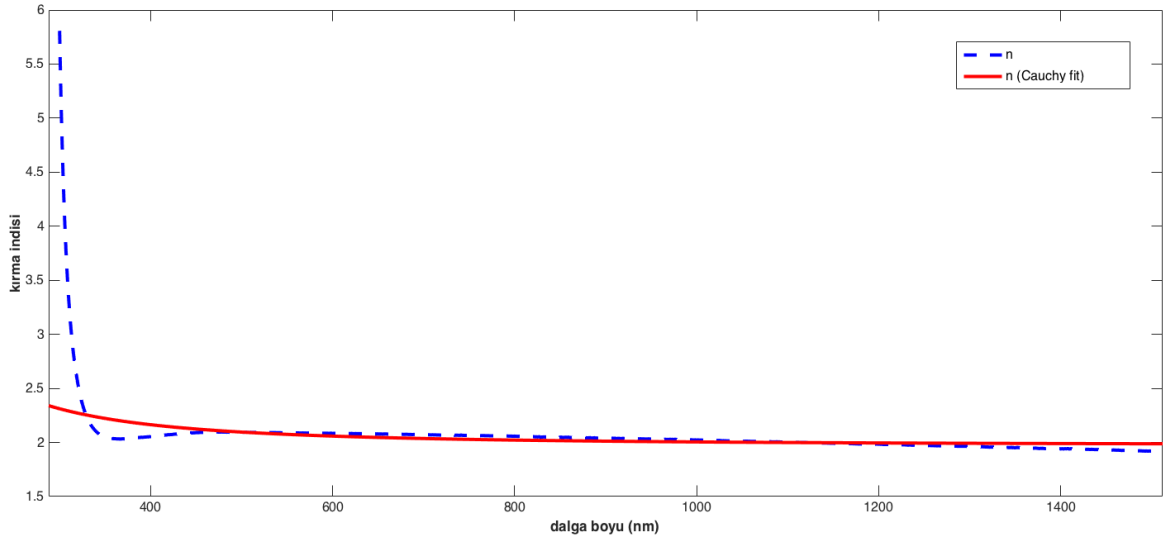
$$x \approx \frac{(n-1)^3 (n+s^2)}{16n^2s} T_0 \quad (1.57)$$

1.4.4. Optik Sabitlerin Hesaplanması

1.4.4.1 Kırma İndisi (n)

Kırma indisinin hesabında Eşitlik 1.53, özellikle soğurmanın başladığı dalga boyundan daha küçük dalga boylarına doğru gidildikçe doğruluğunu kaybetmektedir. Bu noktada Cauchy dispersiyon bağıntısı kullanarak hesaplanan kırma indisi değerleri fit edilmelidir [25]:

$$n_f = A + (B/\lambda^2) + (C/\lambda^4) \quad (1.58)$$



Şekil 1.16 Filmin hesaplanan kırma indisi ve üzerine uygulanan Cauchy fiti.

Bundan sonraki hesaplamalarda Cauchy fit ile elde edilen kırma indisi değeri ($n_f = n$) olarak kullanılacaktır.

1.4.4.2 Film Kalınlığı (d)

Eğer iki ardışık maksimum (veya minimum) dalga boyu λ_1 ve λ_2 ' ye karşılık gelen kırma indisi değerleri n_1 ve n_2 ise, Eşitlik 1.45 ile kalınlık hesabı yapılabilir:

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (1.59)$$

Tüm ekstremum noktalar için bu hesap yapılarak, d değeri için ortalama alınır. Ancak Eşitlik 1.59, kırma indisi hesabında yapılmış olabilecek hatalara karşı çok hassastır. Bu eşitlikten yapılan hesaplamalarda bir

miktar dağınım, özellikle yüksek dalga boylarında, saçakların genişlemesi ile kalınlık hesabında büyük sapmalar görülebilmektedir. Genel kural olarak son iki maksimum için bulunan kalınlık değerleri, ortalama hesabına dahil edilmemelidir.

Bu kalınlık hesabıyla bulunan d_1 değeri ile n_1 değeri kullanılarak Eşitlik 1.45' teki ekstremum noktaların mertebesini ifade eden m değeri bulunabilir. Her dalga boyu için m ' nin tam sayı ya da yarım tam sayı değerini alıp, yeniden n_1 değeri kullanarak Eşitlik 1.45' ten d_2 kalınlık değeri hesaplanabilir.

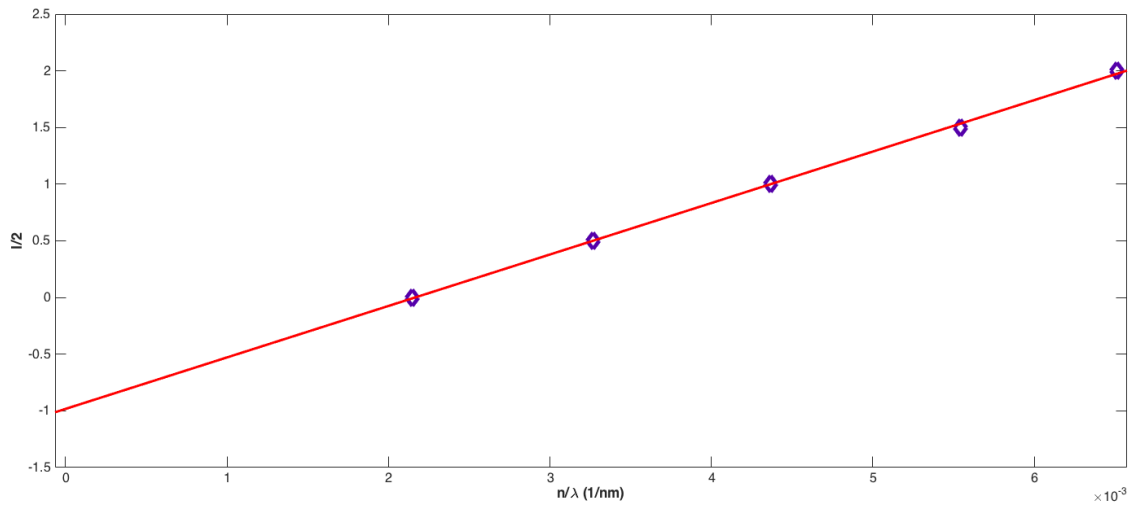
Ancak m ve d değerleri çok daha basit ve daha hassas bir şekilde, Şekil 1.19' da gösterildiği gibi grafik yöntem ile hesaplanabilir. İlk ekstremum noktası için mertebe numarasını m_1 ile ifade edersek, Eşitlik 1.45 spektrumun ekstremum noktaları için şu şekilde yazılabilir:

$$2nd = (m_1 + l/2)\lambda , \quad l = 0, 1, 2, 3 \dots$$

veya

$$l/2 = 2d(n/\lambda) - m_1 \quad (1.60)$$

elde edilir.



Şekil 1.17 Film kalınlığını bulmak için çizdirilen $l/2$ 'ye karşı n/λ grafiği.

Bu yöntem ile $l/2'$ ye karşı n/λ grafiği çizilirse, eğim $2d$ değerini ve çizdirilen eğrinin y eksenini kestiği nokta m_1 değerini verir [25].

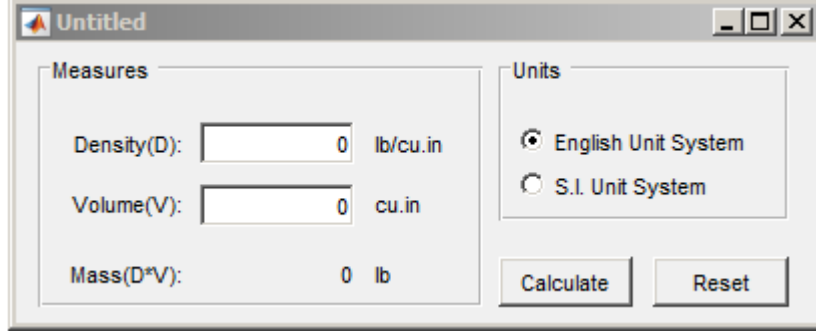
1.5. MatLab Programı

1.5.1. Matlab

MATLAB, MATrix LABoratory kelimelerinin kısaltılmasından oluşmuştur. Bu program ilk geliştirildiğinde amaçlanan, matris işlemlerini kullanıcıların kolaylıkla yapılmasını sağlamaktır. Günümüzde Matlab, basit matematiksel hesaplamalardan detaylı karmaşık analizlere kadar çok çeşitli alanlarda oldukça kullanışlı hale gelmiştir. Bu nedenle son zamanlarda Matlab özellikle bilimsel araştırmalar için tercih edilen ve popüler olarak kullanılan bir ortam haline gelmiştir. Matlab'ın bu denli popüler oluşunun altında sunduğu çok çeşitli komutların yanı sıra, grafiksel arabirime sahip oluşu, kolay alışılabilir ve kullanışlı bir ortam etkileşimi sunması, çok çeşitli alanlara (örneğin Kontrol Bilimi, İnşaat Mühendisliği gibi) hizmet eden farklı ve zengin kütüphanesinin olması yatmaktadır.

1.5.2. Graphical User Interface

İçeriğinde yer alan nesnelerin kullanılması ile kullanıcıya etkileşim sağlayan ve bir işin veya bir programın koşturulmasını sağlayan grafiksel bir program arayüzüdür. Açılımı **Graphical User Interface**'dir (GUI). GUI nesneleri menüler, araç çubukları, radyo butonlar, liste kutuları veya kaydırıcılar olabilir. Bunların yanında MATLAB GUI ile MATLAB'ın sunduğu hesaplama imkanları kullanılarak da data alımı ve grafik çizimi gibi pek çok işlem gerçekleştirilebilir.



Şekil 1.18 Örnek GUI arayüzü.

GUI'nin çalışma şekli şu şekilde açıklanabilir; her bir nesne (veya komponent) GUI için tanımlanan programlama dosyasında callback diye adlandırılan ayrı alt rutin programlama parçalarına sahiptir. Bu şekilde her bir nesnede oluşan olaylara (örnek olarak bir buton nesnesinin tıklanması ile click event oluşması gibi) GUI o olaya ait callback rutinlerini icra ettirir. Yani, GUI hem bir arayüz hem de bir program çağrılarını icra ettirme mekanizması olarak çalışır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Zarf Eğrilerinin Çizdirilmesi

Zarf eğrilerinin çizdirilmesi karakterizasyon sonucuna doğrudan etki ettiği için oldukça önemlidir. Minkov tarafından yapılan çalışmalarda [29-30] bu konuya odaklanılmıştır.

Zarf eğrilerinin çizdirilmesindeki zorluklardan biri, nispeten daha düşük kalınlıklardaki filmlerin geçirgenlik spektrumunda çok az sayıda maksimum ve minimum nokta bulunmasıdır. Bu durumda zarf eğrilerinin referans alacağı nokta sayısı azaldığından doğru zarflar oluşturmak güçleşir. Bir diğer zorluk ise, zarf eğrilerinin geçeceği (maksimum veya minimum) noktaların, zarf eğrilerinin o noktadan sonra izleyeceği yöne göre seçilmesini sağlamaktır. Eğer bu koşul sağlanmazsa eğrileri oluşturan interpolasyon yöntemine göre eğrilerin art arda gelen iki uç nokta arasındaki hareketi rastlantısal olacaktır.

Minkov'un önerdiği algoritma yapısında [30] her iki zarf eğrisini oluşturmak için filmin geçirgenlik spektrumu üzerinde bulunan maksimum ($T_M(\lambda)$) ve minimum ($T_m(\lambda)$) noktalara ilaveten bazı "sınır noktaları", "ek noktalar", "teğet noktaları" ve "yakınsama noktası" kullanılır.

Sınır noktaları, hem filmin hem de alttaşın yüksek geçirgenlikte olduğu en uzun dalga boyu değeri için hesaplanır. Bu noktada hem üst hem de alt zarf eğrisi için Eşitlik 2.1' de verilen denklemler kullanılır.

$$T_M(\lambda_L) = T_M(\lambda_{1M}) + [T_M(\lambda_{1M}) - T_M(\lambda_{2M})] \frac{(\lambda_L - \lambda_{1M})\lambda_{2M}}{(\lambda_{1M} - \lambda_{2M})\lambda_L} \quad (2.1a)$$

$$T_m(\lambda_L) = T_m(\lambda_{1m}) + [T_m(\lambda_{1m}) - T_m(\lambda_{2m})] \frac{(\lambda_L - \lambda_{1m})\lambda_{2m}}{(\lambda_{1m} - \lambda_{2m})\lambda_L} \quad (2.1b)$$

Burada λ_L spektrumdaki en yüksek dalga boyunu, λ_{1M} ve $\lambda_{2M} < \lambda_{1M}$ (λ_{1m} ve $\lambda_{2m} < \lambda_{1m}$) spektrumdaki en yüksek dalga boyuna sahip maksimum

(minimum) iki noktayı belirtir. Sınır noktalarını belirlemek, zarf eğrilerinin transparan bölgede daha doğru çizdirilmesine olanak sağlar.

Orta soğurma bölgesinde dalga boyu azaldıkça artan soğurma sebebiyle incelenen spektrumun tüm belirgin maksimum ve minimumlarından daha küçük dalga boyları için, yani $\lambda < \min(\lambda_M, \lambda_m)$ için üst ve alt zarf eğrileri arasındaki mesafe azalacaktır. Dolayısıyla daha doğru üst ve alt zarf eğrisi oluşturabilmek için bir veya iki çift "ek nokta" $T_M(\lambda_{Mad})$ ve $T_m(\lambda_{mad})$ eklenebilir. $T_M(\lambda_{Mad})$ ve $T_m(\lambda_{mad})$, bu spektral bölgede pozitif bir değeri olan ($T_{film}'(\lambda) > 0$) filmin geçirgenlik spektrumunun birinci türevinin maksimum ve minimumuna karşılık gelir.

Daha güçlü soğurma olan bölgede dalga boyu azaldıkça hem filmin geçirgenlik eğrisi hem de zarf eğrileri birbirine yakınlaşarak sıfıra doğru gider. İki zarf eğrisinin birbirine yakınlaşmasının bittiği "yakınsama noktası" $T(\lambda_c)$ ' yi bulabilmek için Eşitlik 2.2' de gösterildiği gibi incelenen spektrumun tüm belirgin maksimum ve minimumlarından daha küçük dalga boylarında, yani $\lambda < \min(\lambda_M, \lambda_m)$ bölgesinde, geçirgenlik eğrisinin ikinci türevinin maksimum değerindeki dalga boyuna denk gelen geçirgenlik değeri alınır.

$$T(\lambda_c) = \max [T_{film}''(\lambda)] \quad (2.2)$$

Bulunan tüm noktalara ($T_M(\lambda)$, $T_m(\lambda)$, $T_M(\lambda_L)$, $T_m(\lambda_L)$, $T_M(\lambda_{Mad})$, $T_m(\lambda_{mad})$ ve $T(\lambda_c)$) göre geçici zarf eğrileri ($T_{pseudo_up_env}(\lambda)$ ve $T_{pseudo_down_env}(\lambda)$) çizdirilir ve gerçek zarf eğrilerini çizdirebilmek için filmin geçirgenlik eğrisi ile geçici zarf eğrileri arasındaki "teğet noktaları" bulunmalıdır. Filmin geçirgenlik eğrisinin birinci türevi ile geçici üst zarf eğrisinin birinci türevinin farkının mutlak değeri ile verilen $D_M(\lambda)$ ve yine filmin geçirgenlik eğrisinin birinci türevi ile geçici alt zarf eğrisinin birinci türevinin farkının mutlak değeri ile verilen $D_m(\lambda)$ hesaplanır.

$$D_M(\lambda) = |T'_{film}(\lambda) - T'_{pseudo_up_env}(\lambda)| \quad (2.3a)$$

$$D_m(\lambda) = |T'_{film}(\lambda) - T'_{pseudo_down_env}(\lambda)| \quad (2.3b)$$

$T_{film}(\lambda)$ ve $T_{pseudo_up_env}(\lambda)$ arasındaki teğet noktalar $T_{Mt}(\lambda_{Mt})$, $\lambda_C < \lambda_{Mt} < \lambda_L$ aralığında dalga boyuna göre $D_M(\lambda)$ fonksiyonunun yerel minimumu bulunarak hesaplanır. Aynı şekilde $T_{film}(\lambda)$ ve $T_{pseudo_down_env}(\lambda)$ arasındaki teğet noktalar $T_{mt}(\lambda_{mt})$, $\lambda_C < \lambda_{mt} < \lambda_L$ aralığında dalga boyuna göre $D_m(\lambda)$ fonksiyonunun yerel minimumu bulunarak hesaplanır.

Zarf eğrilerinin son halini ($T_{up_env}(\lambda)$ ve $T_{down_env}(\lambda)$) çizdirmek için bulunan bu tüm noktalar kullanılır.

2.2. Optik Sabitlerin Hesaplanması

2.2.1. Soğurma Sabiti (α) ve Sönüm Katsayısı (k)

Eşitlik 1.56 'da Manifacier tarafından önerilen soğurma (x) denklemini verilmektedir. Fakat Kar yaptığı çalışmada soğurma hesabı için yeni bir denklem önermiştir [31]:

$$\rho = (T_M - T_m) / T_M T_m$$

tanımı yapılırsa, Eşitlik 1.56 şu şekilde yazılabilir:

$$\rho = \frac{(n^2-1)(n^2-s^2)}{4n^2s}. \quad (2.4)$$

Böylece, üst zarf eğrisini kullanarak:

$$x = \frac{(n+1)(n+s) \left[\sqrt{1+\rho T_M-1} \right]}{(n-1)(n-s) \left[\sqrt{1+\rho T_M+1} \right]} \quad (2.5)$$

ya da alt zarf eğrisi kullanarak:

$$x = \frac{(n+1)(n+s) \left[\sqrt{1-\rho T_m-1} \right]}{(n-1)(n-s) \left[\sqrt{1-\rho T_m+1} \right]} \quad (2.6)$$

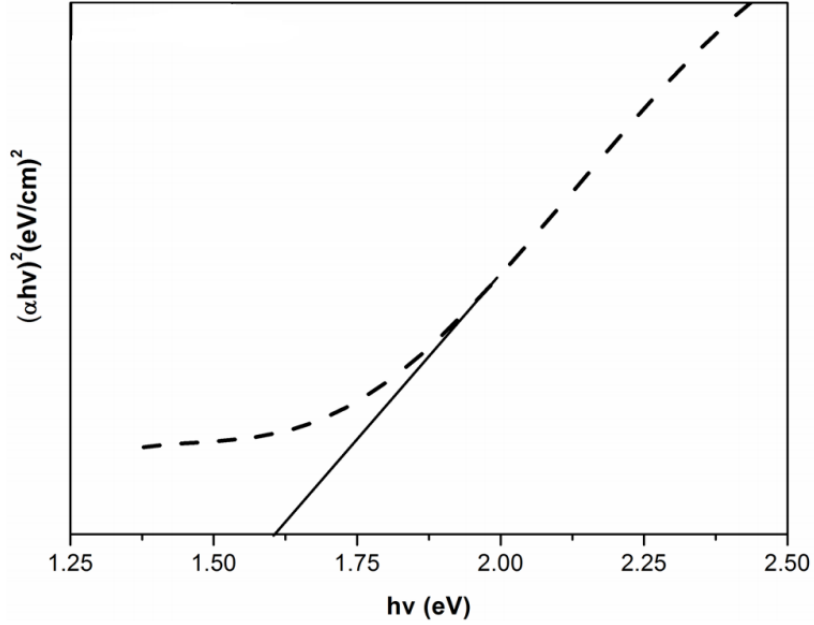
soğurma hesabı yapılabilir. Eşitlik 1.47f ve 1.47g ile soğurma sabiti ve sönüm katsayısı hesaplanabilir.

2.2.2. Optik Bant Aralığı (E_g)

Optik bant aralığı, malzemenin soğurma sabiti elde edildikten sonra hesaplanabilir. Bunun için Eşitlik 2.7' de verilen Tauc eşitliği oldukça pratiktir [5].

$$\alpha hv = A(hv - E_g)^m \quad (2.7)$$

Eşitlikte A bir sabit, α soğurma sabiti, hv gelen ışığın enerjisi, E_g optik bant aralığı ve m izinli direk olmayan geçişler, yasak direk olmayan geçişler, izinli direk geçişler ve yasak direk geçişler için sırasıyla 2, 3, 1/2 ve 1/3 değerlerini alır. Eğer Şekil 2.1'deki gibi $(\alpha hv)^{1/m}$ değerlerine karşı hv değerlerinin grafiği çizilirse, bu grafiğin teğetinin x-eksenini kestiği nokta, malzemenin optik bant aralığını verecektir.



Şekil 2.1 Tauc tarafında geliştirilen yöntem ile optik bant aralığının bulunması.

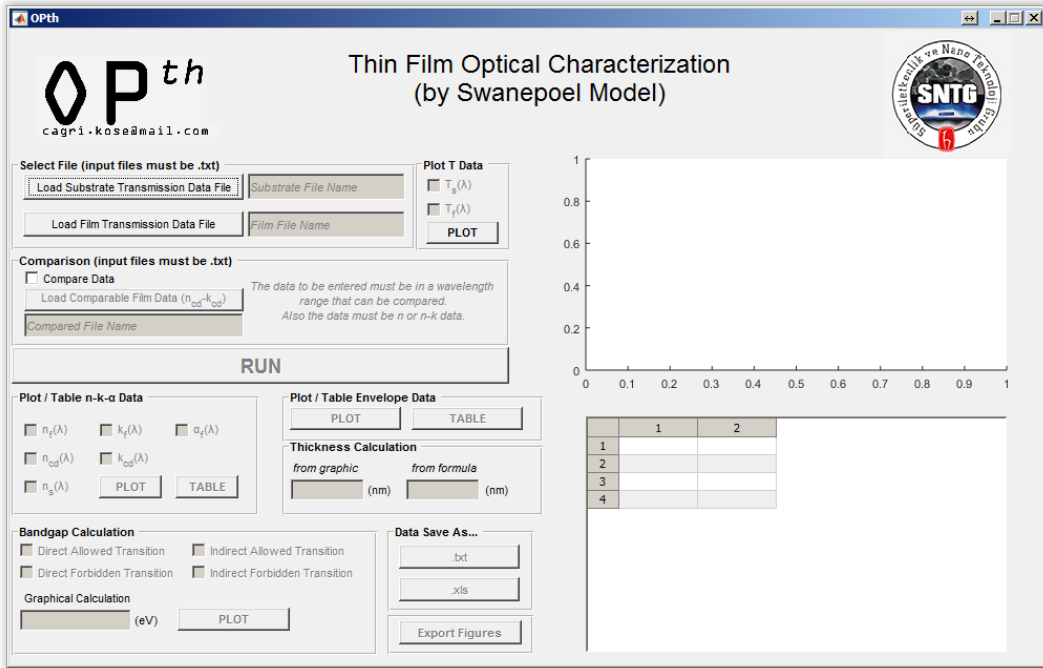
3. OPth PROGRAMI

3.1. Programın Hazırlanması

OPth programının hazırlanması aşamasında potansiyel kullanıcıların ihtiyaçları göz önüne alınmış, arayüz tasarımı bu doğrultuda geliştirilmiş ve kodlamasının daha sonra geliştirilmeye imkan sağlaması hedeflenmiştir.

Program, MATLAB GUI üzerinde arayüzün görsel tasarımı yapıldıktan sonra arayüze ait bileşenleri işlevsel hale getirmek için bileşenlerin kodlaması yapılarak hazırlanmıştır.

OPth programının arayüzünde Şekil 3.1'de görüldüğü gibi komutları çalıştıran butonlar, seçim yapmayı sağlayan işaret kutucukları, arayüz ekranından ayrılmadan grafiklerin arayüz üzerinde gösterilebilmesi amacıyla bir grafik eksen ve kullanılan veya hesaplanan verileri görebilmek için bir tablo yer almaktadır.



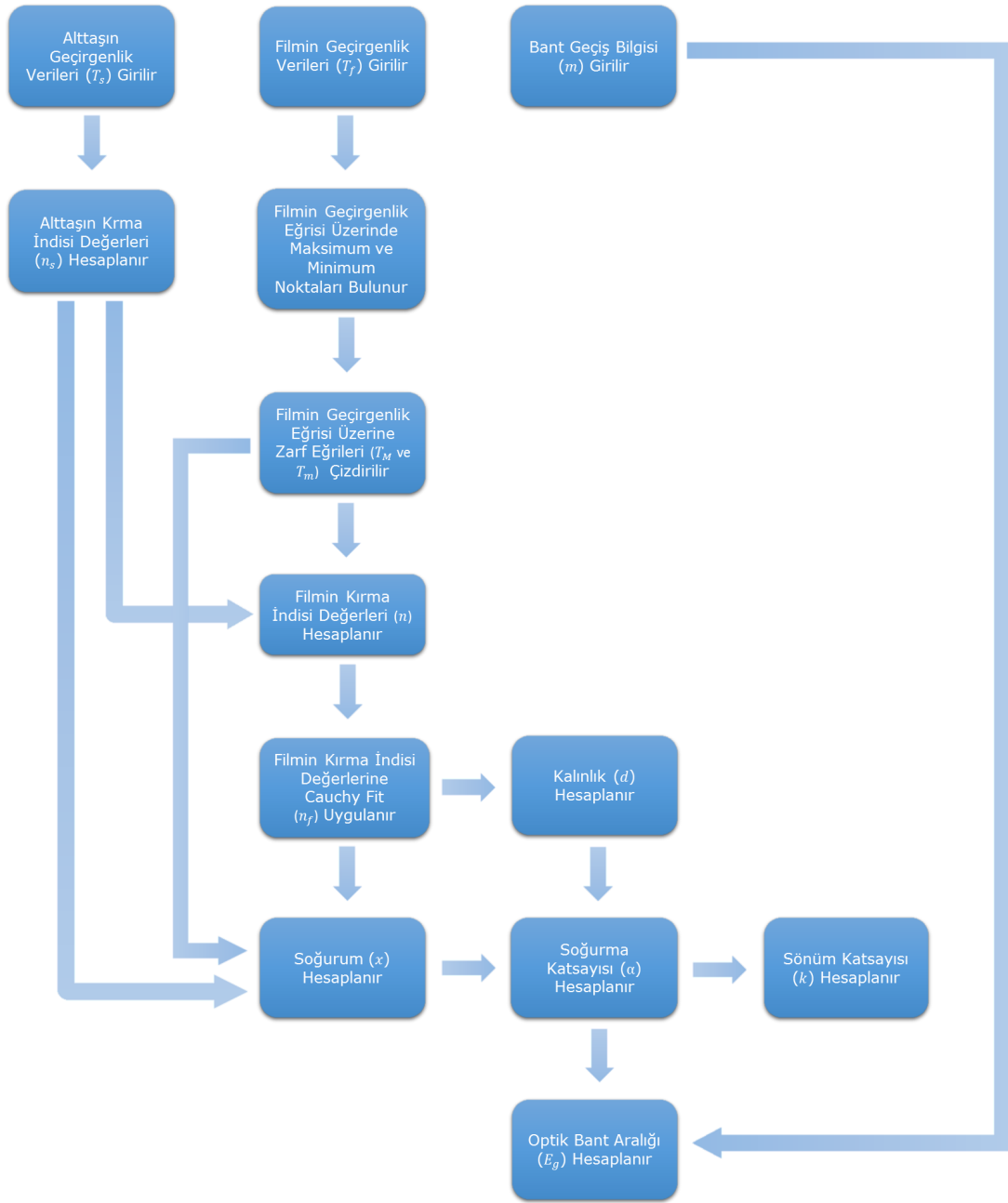
Şekil 3.1 OPth programı arayüzü.

Kullanıcıların yapabilecekleri hatalara karşı önlemler düşünülmüş, gerekli yerlerde uyarı mesajları ekrana verilerek ya da butonların pasif

kalması sağlanarak kullanıcıların olabildiğince hatadan uzak kalmaları hedeflenmiştir. OPth programı, özellikle alttaşın ve filmin geçirgenlik verilerinin hem aynı cihazlardan alınacağı yani aynı dalga boyu aralığında ve aynı artış yada azalış adımlarına sahip olacağı hem de cihazlardan alınan verilerin doğru olduğu düşünülerek programlanmış ve bu durum programın hesap yapmaya başlayabilmesi için koşul olarak atanmıştır.

Program çıktılarının doğruluğunu anlayabilmek için birçok farklı ince film örneğine ait veriler kullanılmıştır.

OPth programının akış şeması Şekil 3.2'de verildiği gibidir.



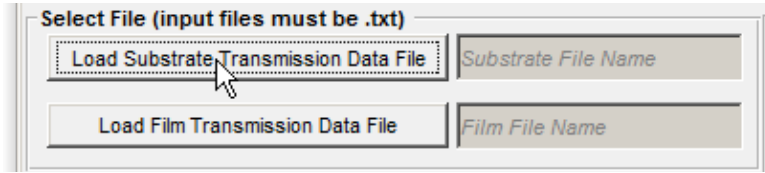
Şekil 3.2 OPth programının akış şeması.

Zarf metodu için program hazırlanırken en önemli noktalardan biri girilen veri aralıklarının aynı olmasını sağlamaktır. Bu konuda sorun oluşmaması için OPth programında uygulanan adımlardan biri, girilen alttaş ve film verilerini, verilerin mevcut spektrumu içerisinde 0.1 nm dalga boyu aralıklı olacak ve asıl değerlerinden sapmayacak şekilde interpolate edilmesidir.

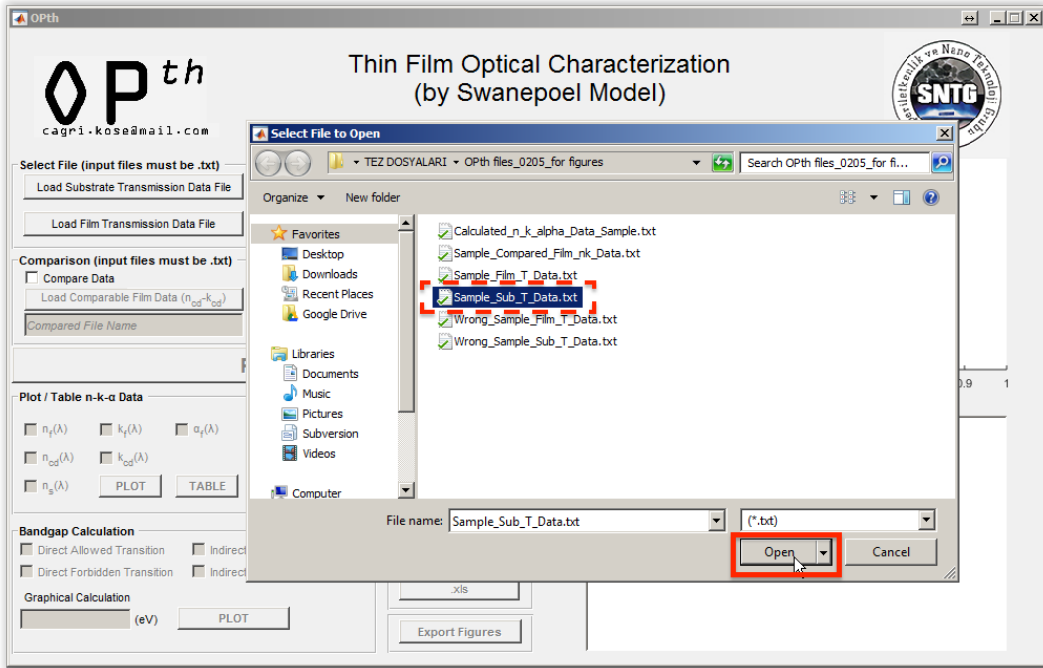
3.2. Programın Kullanımı

OPth programı olabildiğince sade ve anlaşılabilir bir arayüz ile hazırlanmıştır. Programın çalıştırılması ile Şekil 3.1’de görülen arayüz ekrana gelmektedir.

Programa girdi olarak alttaşın ve filmin geçirgenlik verileri girilmelidir. Bunun için Şekil 3.3’de gösterildiği gibi “Select File (Dosya Seç)” alanının altında bulunan “Load Substrate Transmission Data (Alttaşın Geçirgenlik Verisini Gir)” butonuna basılması ile Şekil 3.4’deki gibi dosya seçme penceresi açılır ve alttaşa ait istenen veri dosyası seçilerek “Open (Aç)” tuşuna basılır.

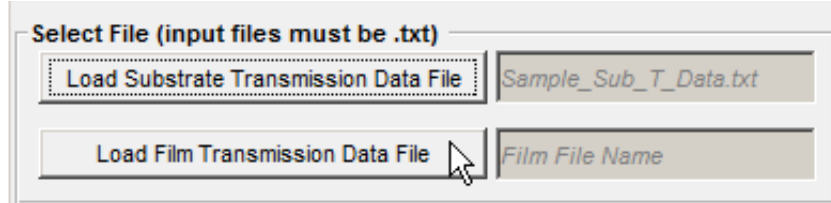


Şekil 3.3 Alttaşın geçirgenlik verisinin girilmesi.

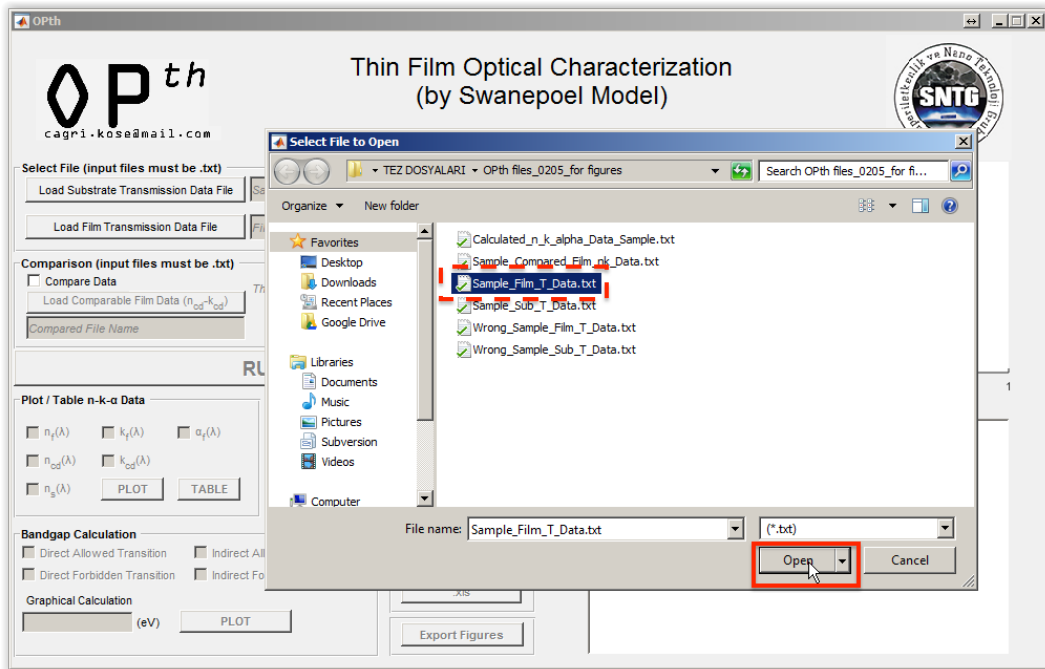


Şekil 3.4 Alttaş geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.

Şekil 3.5’de istenen filme ait veri dosyasını programa girmek için basılacak “Load Film Transmission Data (Filmin Geçirgenlik Verisini Gir)” tuşu gösterilmektedir. Bu tuşa basıldıktan sonra Şekil 3.6’daki gibi açılan dosya seçimi penceresinden film dosyası seçilir ve “Open (Aç)” tuşuna basılır.



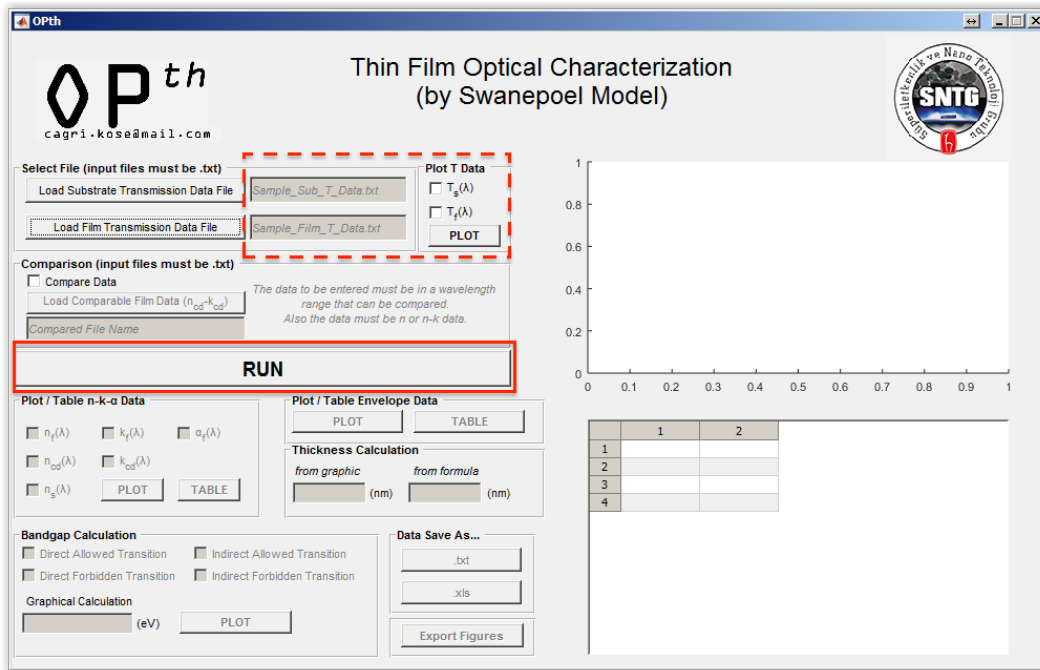
Şekil 3.5 Filmin geçirgenlik verisini girilmesi.



Şekil 3.6 Film geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.

Alttaş ve filme ait veri dosyaları programa girildikten sonra Şekil 3.7’deki gibi alttaşın ve filmin dosya isimleri “Load Substrate Transmission Data (Alttaşın Geçirgenlik Verisini Gir)” ve “Load Film Transmission Data (Filmin Geçirgenlik Verisini Gir)” butonlarının yanındaki kutularda da görülür. Ayrıca “Plot T Data (Geçirgenlik Verilerini Çizdir)” alanı altındaki $T_s(\lambda)$ ve $T_f(\lambda)$ kutucukları seçilebilir olur. Yine bu alandaki “PLOT (ÇİZDİR)” tuşuna basılarak spektrumlar ayrı ayrı

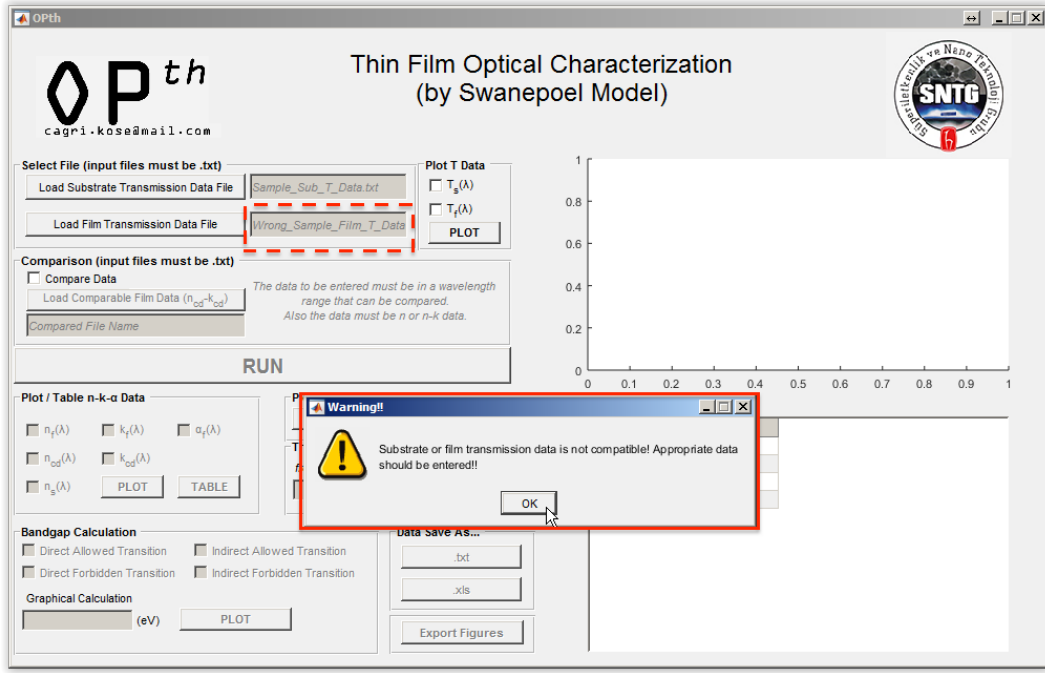
ya da birlikte grafik ekseninde çizdirilebilirler. Programın ihtiyaç duyduğu girdiler verildiği için, "RUN (ÇALIŞTIR)" butonu aktif hale gelir.



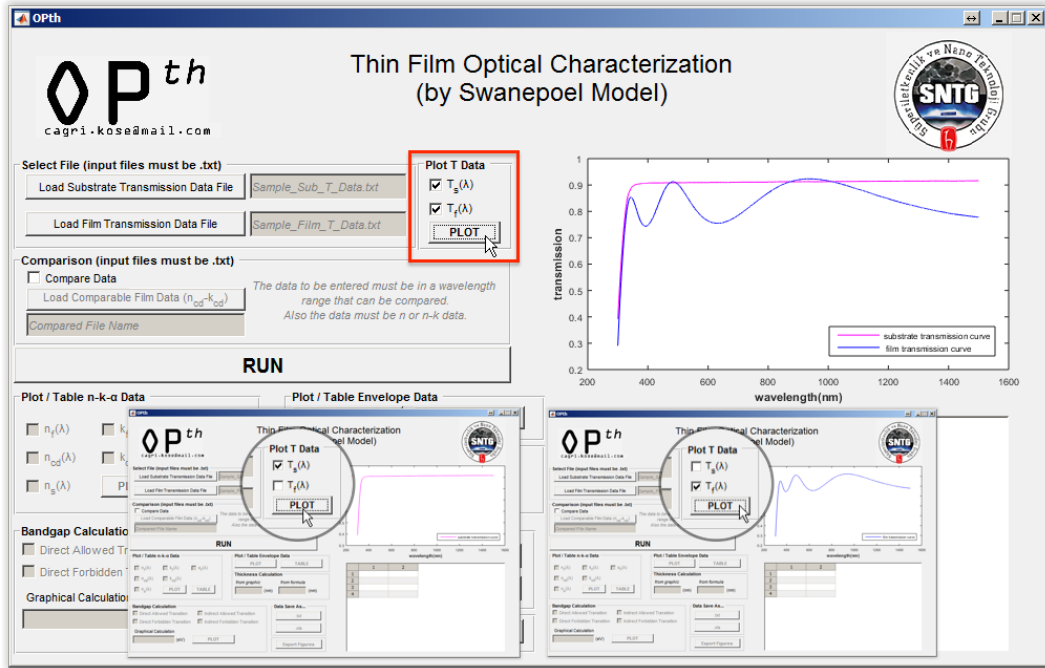
Şekil 3.7 Girdi dosya isimleri ve RUN butonunun açılması.

Eğer seçilen film geçirgenlik spektrumu ile alttaş geçirgenlik spektrumu arasında başlangıç ve bitiş dalga boyu, veri aralıkları gibi uyumsuzluklar varsa, OPth programı Şekil 3.8'deki gibi uyarı mesajı verir.

"Plot T Data (Geçirgenlik Verilerini Çizdir)" alanı altındaki $T_s(\lambda)$ ve $T_f(\lambda)$ kutucuklarının aktif olması ile Şekil 3.9'daki gibi filmin ve alttaşın geçirgenlik spektrumları ayrı ayrı ya da birlikte çizdirilebilir.



Şekil 3.8 Film ve alttaş verileri arasında uyumsuzluk olduğunda OPth programının verdiği uyarı mesajı.

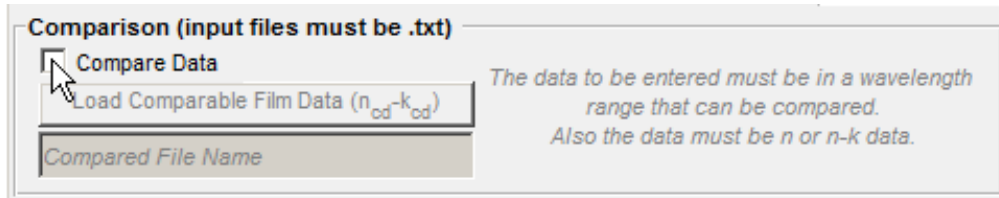


Şekil 3.9 Geçirgenlik verilerinin çizdirilmesi.

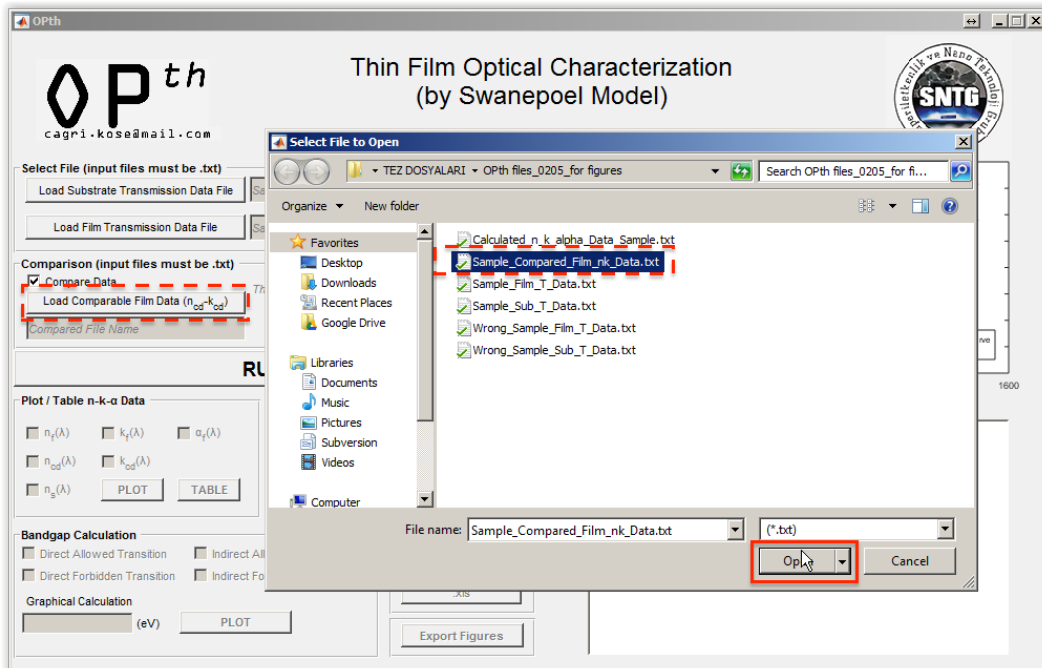
Eğer girilen alttaş ve film verileri spektral aralık anlamında uyumsuzsa ve Şekil 3.8'deki gibi uyarı mesajı alındıysa, uyumsuzlukları hızlıca görebilmek için dosya isimlerinin yazdığı yere bakılabilir veya "Plot T

Data (Geçirgenlik Verilerini Çizdir)" alanı altından spektrumlar çizdirilebilir. Bu durumda "RUN (ÇALIŞTIR)" butonu, veri uyumsuzluğunda hesaplama yapılamayacağı için pasif olur ve karakterizasyon işlemine devam edilemez.

Karakterize edilecek malzemeye ait örnek bir kırma indisi veya kırma indisi ve sönüm katsayısı verileri varsa OPth programına girdi olarak verilip, arayüz üzerinde karakterizasyon sonuçları ile karşılaştırması yapılabilir. Şekil 3.10'daki gibi "Comparison (Karşılaştırma)" alanının altındaki "Compare Data (Veri Karşılaştırma)" kutucuğu işaretlenir ve "Load Comparable Film Data (Karşılaştırılacak Film Verisi Gir)" butonu aktif hale gelir.



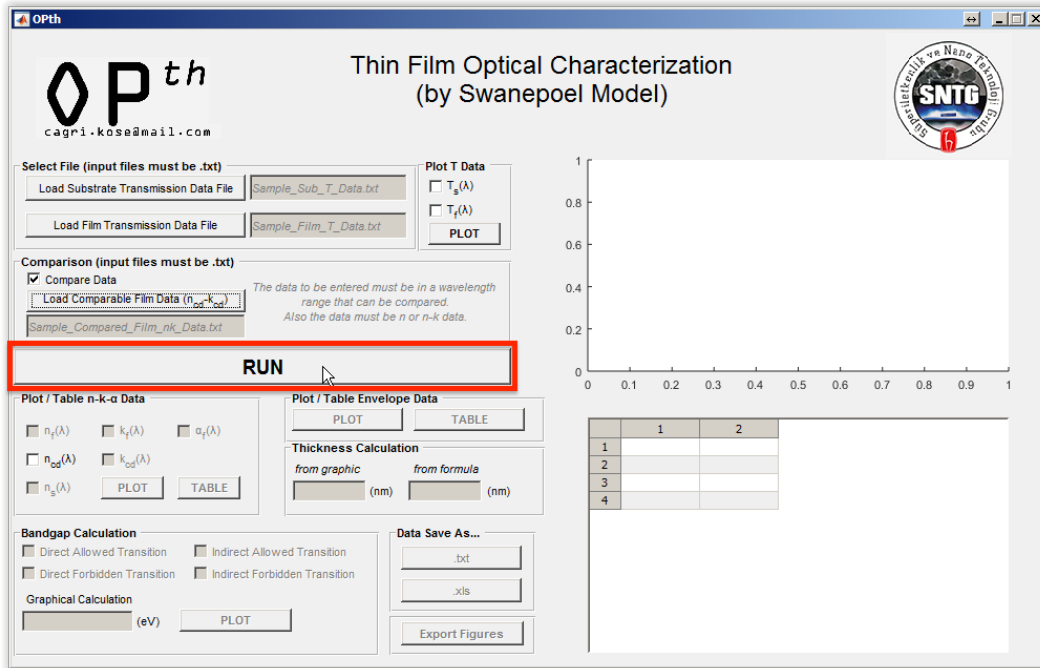
Şekil 3.10 Veri karşılaştırma kutucuğunun aktif edilmesi.



Şekil 3.11 Karşılaştırılacak filmin geçirgenlik veri dosyasının seçilmesi.

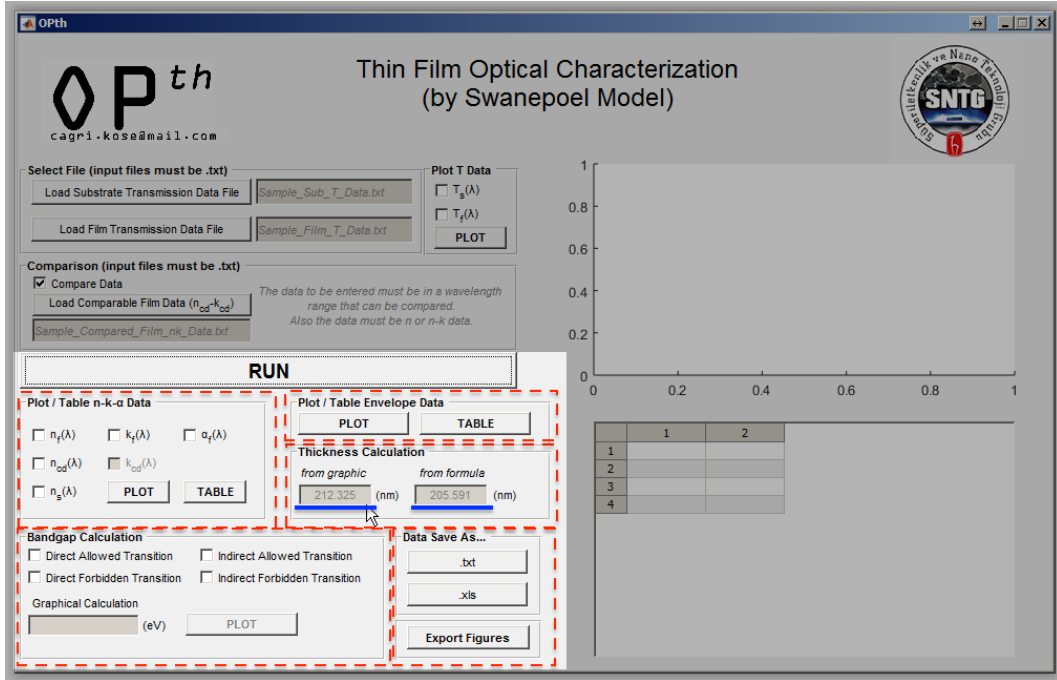
“Load Comparable Film Data (Karşılaştırılacak Film Verisi Gir)” butonuna basılması ile karşılaştırma yapılacak veri dosyasının seçimi, Şekil 3.11’deki gibi yapılır. Burada önem verilmesi gereken ve “Comparison (Karşılaştırma)” alanında uyarı olarak belirtilen nokta, karşılaştırma yapılacak spektrum ile karakterizasyonu yapılacak spektrumun yakın bir aralıkta olmasının, karşılaştırmayı anlamlı kılacağıdır.

Karakterizasyonu başlatmak için Şekil 3.12’deki gibi “RUN (ÇALIŞTIR)” butonuna basılır ve karakterizasyon işlemini bitmesi ile Şekil 3.13’deki gibi kalınlık hesapları “Thickness Calculation (Kalınlık Hesabı)” alanında ekrana yansır, “Plot / Table n-k- α Data (n-k- α Verilerini Çizdir ya da Tabloda Göster)” alanı altındaki $n_f(\lambda)$, $k_f(\lambda)$, $\alpha_f(\lambda)$ ve $n_s(\lambda)$ işaret kutucukları aktif hale gelir (eğer karşılaştırılacak film verisi girildiyse $n_{cd}(\lambda)$ ve/veya $k_{cd}(\lambda)$ işaret kutucukları da aktif olur), karakterizasyonun hangi zarf eğrileri ile yapıldığını ve zarf eğrilerinin dalga boyuna karşı değerlerini görmek de mümkün olur. Bunun için “Plot / Table Envelope Data (Zarf Eğrilerine ait Verileri Çizdir ya da Tabloda Göster)” alanı altındaki “PLOT (ÇİZDİR)” ve “TABLE (TABLOLA)” butonları da aktifleşir.



Şekil 3.12 Karakterizasyon işlemine başlanması.

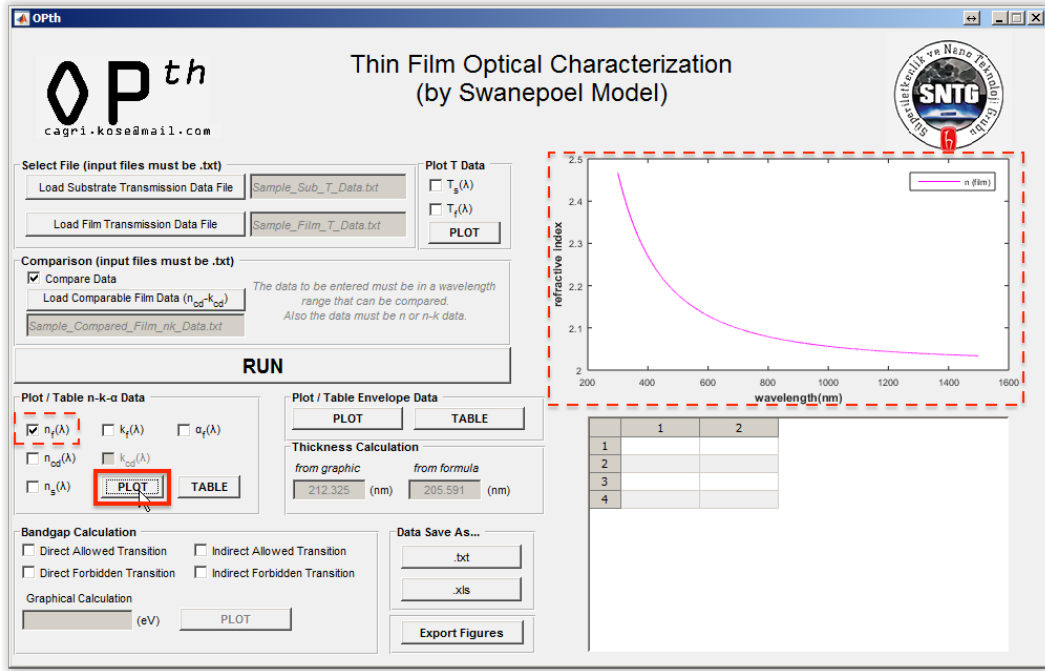
Ayrıca "Bandgap Calculation (Bant Aralığı Hesabı)" ile bant aralığı hesabı ve "Data Save As (Verileri kaydet)" ile karakterizasyon çıktılarını .txt ya da .xls olarak kaydetme butonları kullanılabilir olur. Ayrıca girdi ve çıktıların grafiklerini almak da "Export Figures (Şekilleri Dışa Aktar)" butonun aktif olması ile mümkün hale gelir.



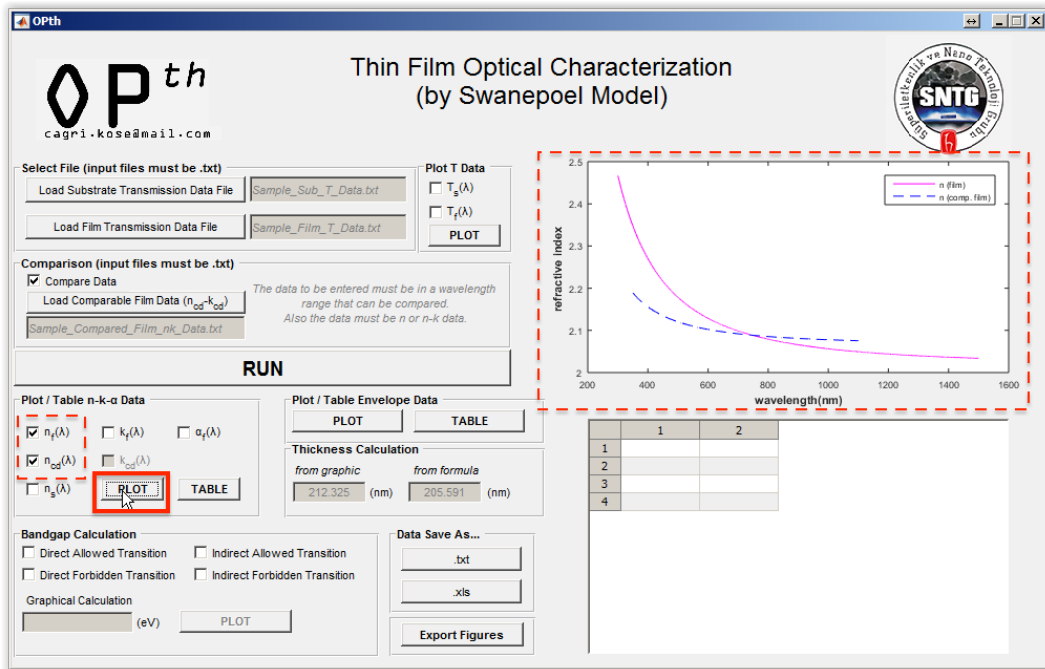
Şekil 3.13 Karakterizasyon işleminin bitmesi ile bulunan film kalınlığı ve aktif olan butonlar.

Aktif olan butonlar ile karakterizasyon işleminin sonuçları OPth programı üzerindeki grafik ekseninden ya da tablodan incelenebilir. Örnek olarak, dalga boyuna karşı filmin hesaplanan kırma indisinin grafiği Şekil 3.14'de gibi çizdirilir.

Aynı işlem karakterizasyon sonrası hesaplanan ve arayüz üzerindeki "Plot / Table n-k-alpha Data (n-k-alpha Verilerini Çizdir ya da Tabloda Göster)" alanı altında işaret kutucuğu aktif hale gelen tüm veriler için yapılabilir. Grafik ekseninde hesaplanan kırma indisi ve karşılaştırılacak filmin kırma indisi değerleri Şekil 3.15'deki gibi birlikte de çizdirilebilir.



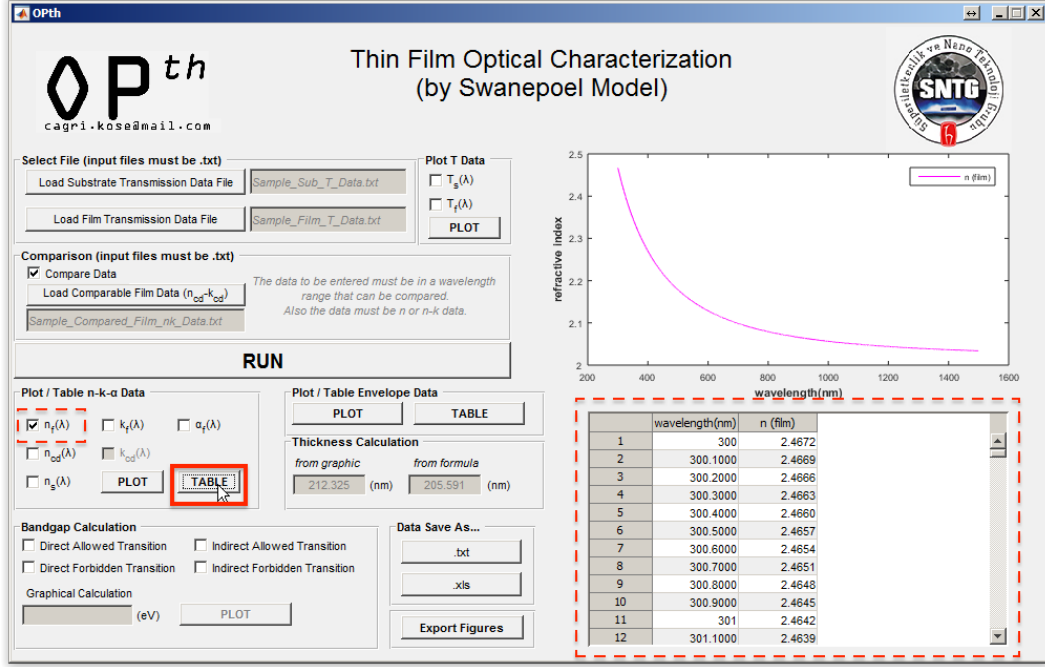
Şekil 3.14 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı kırma indisi grafiğinin çizdirilmesi.



Şekil 3.15 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı hesaplanan ve karşılaştırılan filmlerin kırma indisi grafiklerinin birlikte çizdirilmesi.

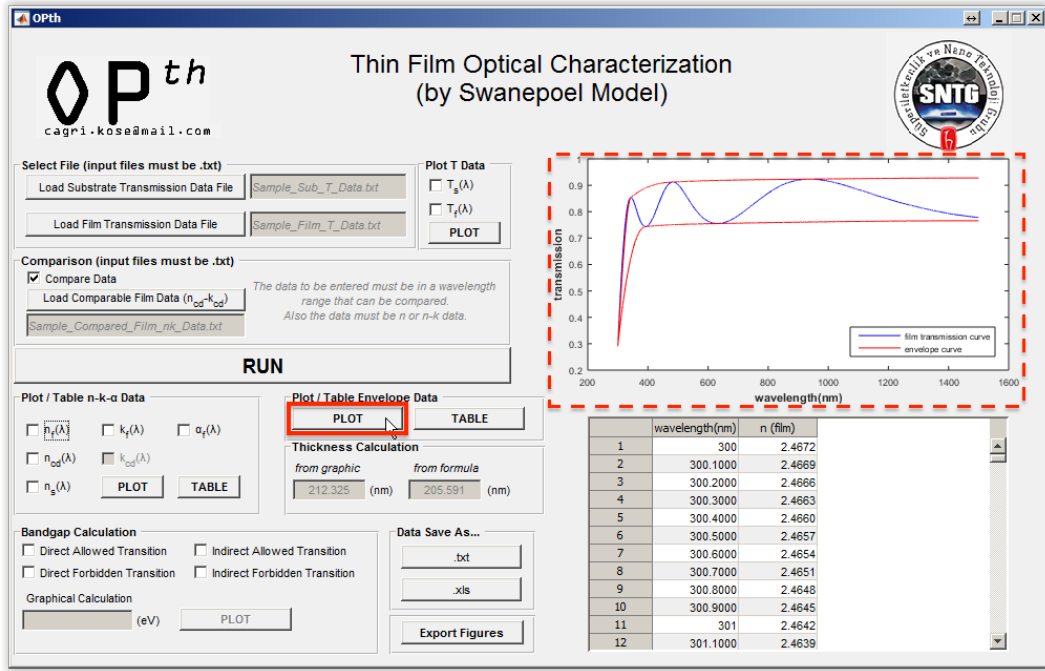
OPth programında, arayüz üzerindeki "Plot / Table n-k- α Data (n-k- α Verilerini Çizdir ya da Tabloda Göster)" alanı altında işaret kutucuğu

aktif hale gelen tüm verilerin sayısal değerleri, yine arayüz üzerindeki tabloda da gösterilebilir. Şekil 3.16'da dalga boyuna karşı filmin hesaplanan kırma indisi değerlerinin tablo hali görülür.

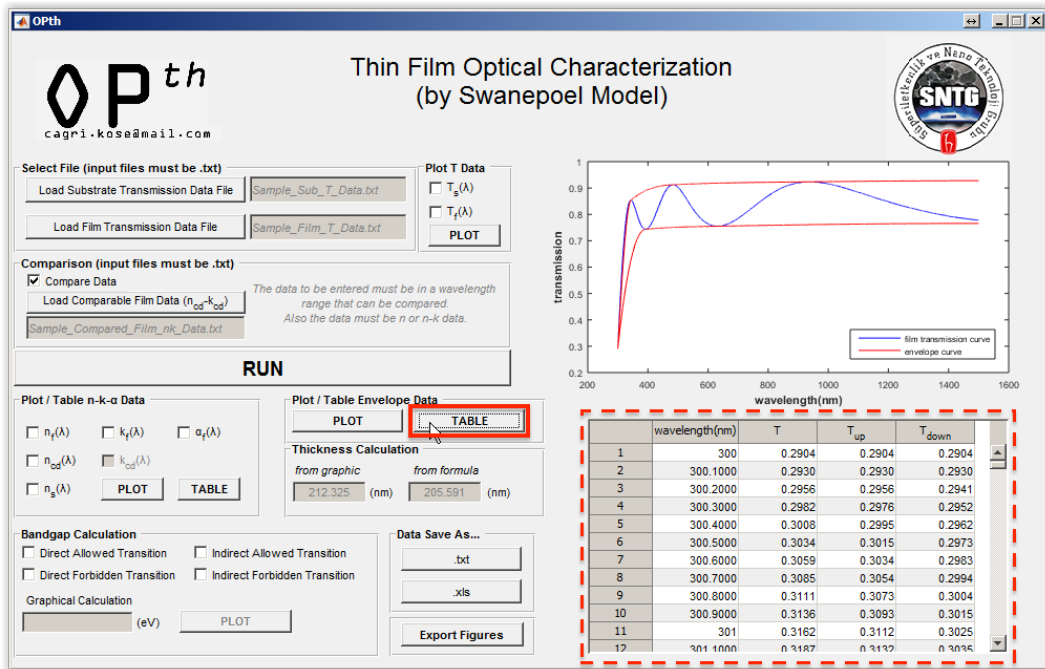


Şekil 3.16 Arayüz üzerindeki tabloda dalga boyuna karşı kırma indisi değerlerinin gösterilmesi.

Karakterizasyonun ilk adımı olan zarflama işlemi, Şekil 3.17 ve 3.18'deki gibi, "Plot / Table Envelope Data (Zarf Eğrilerine ait Verileri Çizdir ya da Tabloda Göster)" alanı altındaki "PLOT (ÇİZDİR)" ve "TABLE (TABLOLA)" butonları ile incelenebilir.



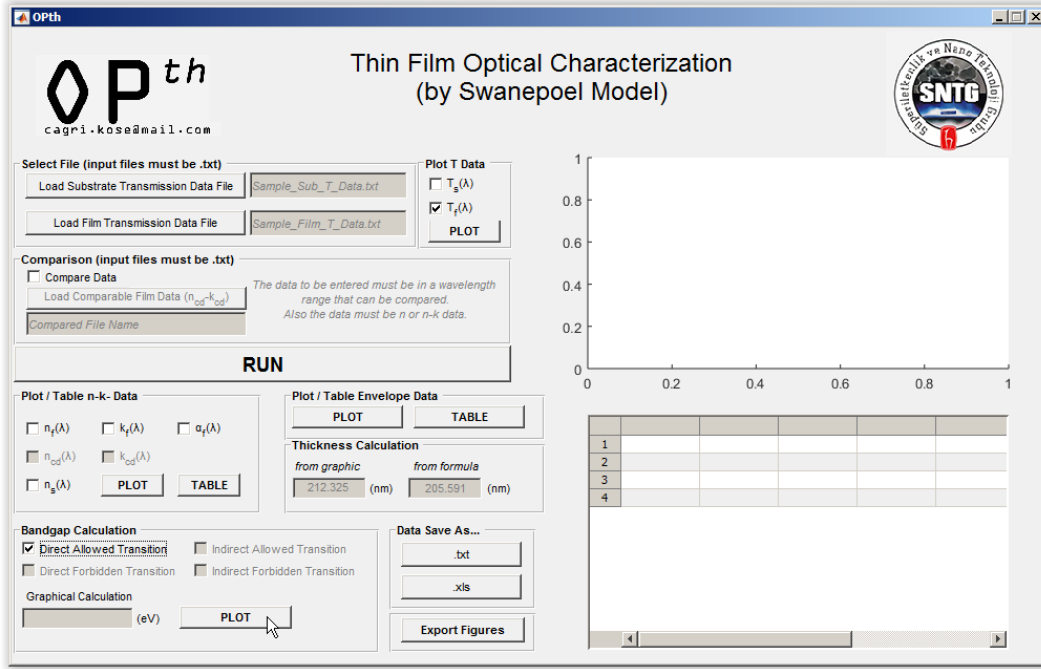
Şekil 3.17 Arayüz üzerindeki grafik ekseninde dalga boyuna karşı film geçirgenlik eğrisi ile birlikte zarf eğrilerinin çizdirilmesi.



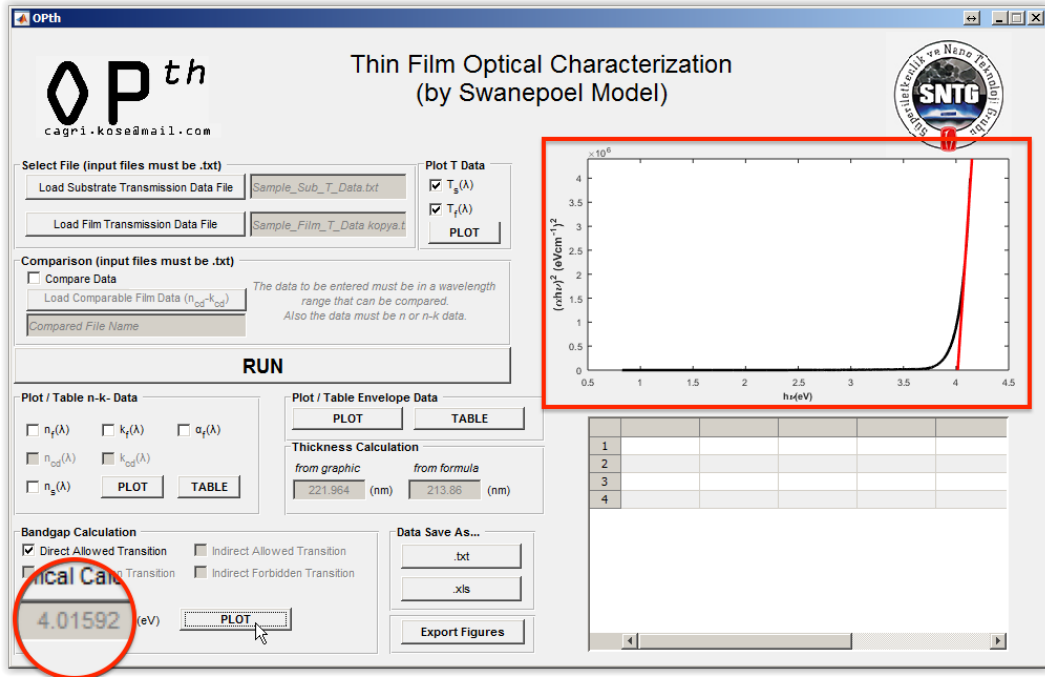
Şekil 3.18 Arayüz üzerindeki tabloda dalga boyuna karşı film geçirgenlik eğrisi ile birlikte zarf eğrisi değerlerinin gösterilmesi.

Filmin optik bant aralığının Tauc çizimi ile hesabı, Bandgap Calculation (Bant Aralığı Hesabı) alanı altında "Direct Allowed Transition (İzinli

Direk Geçişler)”, “Direct Forbidden Transition (Yasak Direk Geçişler)”, “Indirect Allowed Transition (İzinli Direkt Olmayan Geçişler)” ve “Indirect Forbidden Transition (Yasak Direkt Olmayan Geçişler)” seçeneklerinden filme uygun olanının seçilmesi ve Şekil 3.19’deki gibi “PLOT (ÇİZDİR)” butonuna basılması yapılır. Şekil 3.20’de de hesaplanan optik bant aralığı görülür.

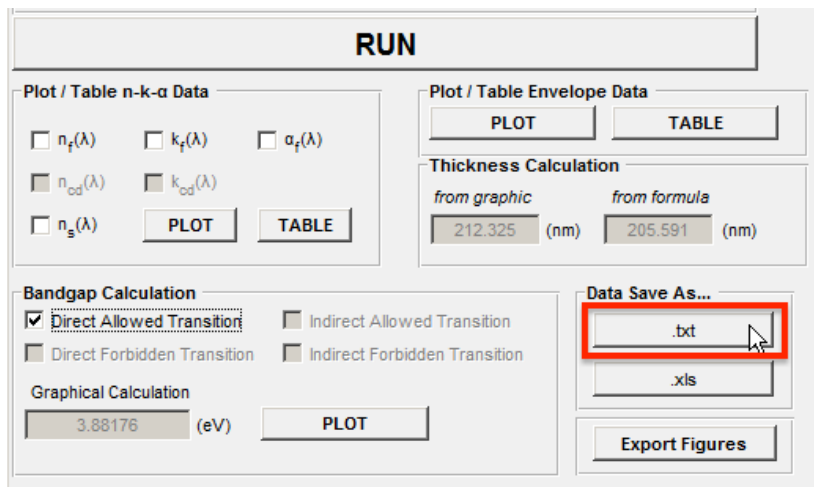


Şekil 3.19 Optik bant aralığı hesabı için malzemeye ait bant geçişi seçimi.

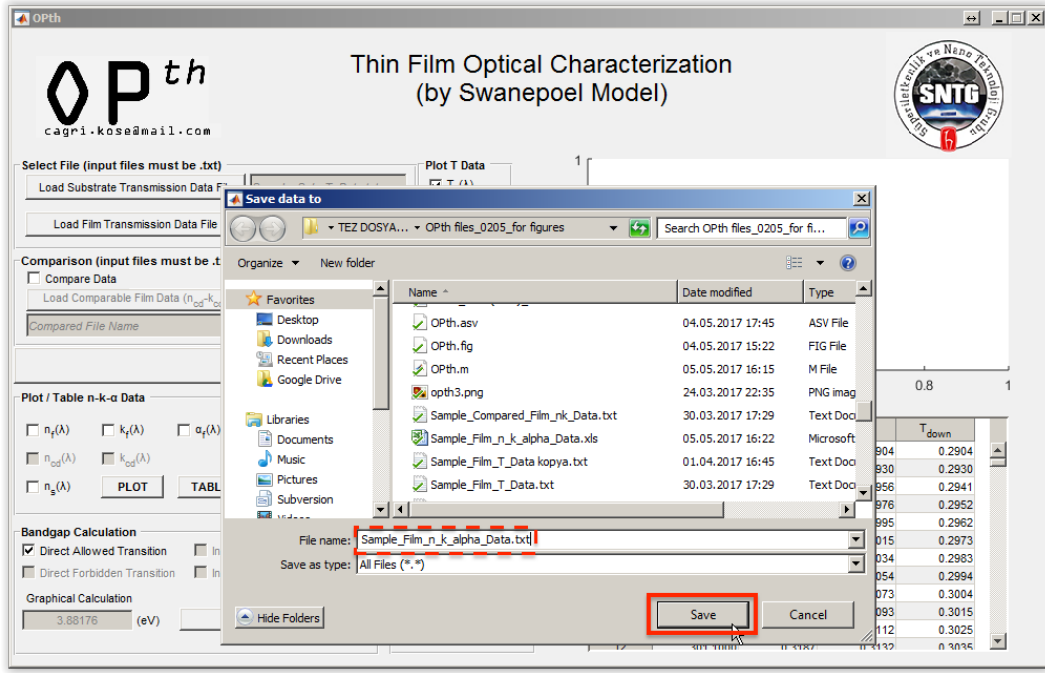


Şekil 3.20 Malzemeye ait optik bant aralığı değerinin arayüz üzerinde gösterilmesi.

Karakterizasyon sonucu elde edilen değerler kaydedilmek istenirse, hesaplanan n , k ve α değerleri .txt veya .xls dosyaları şeklinde kaydedilebilir. Şekil 3.21'deki gibi "Data Save As (Verileri kaydet)" alanı altındaki ".txt" butonuna basılırsa, Şekil 3.21'deki gibi bir dosya kayıt ekranı görünür. Bu ekranda kaydedilecek dosyanın ismi girilir ve "Save (Kaydet)" butonuna basılır. Oluşturulan .txt dosyası Şekil 3.22'deki gibidir.



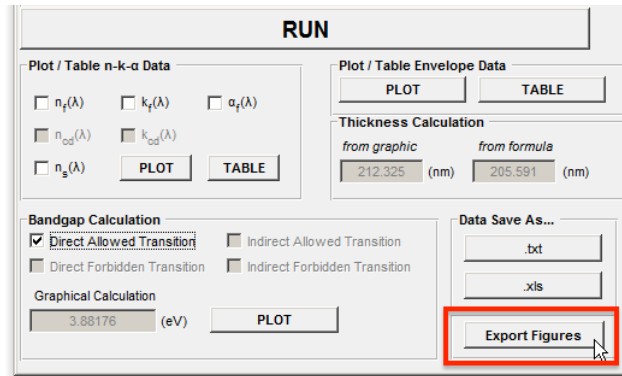
Şekil 3.21 Elde edilen verilerin .txt dosyası olarak kaydedilmesi.



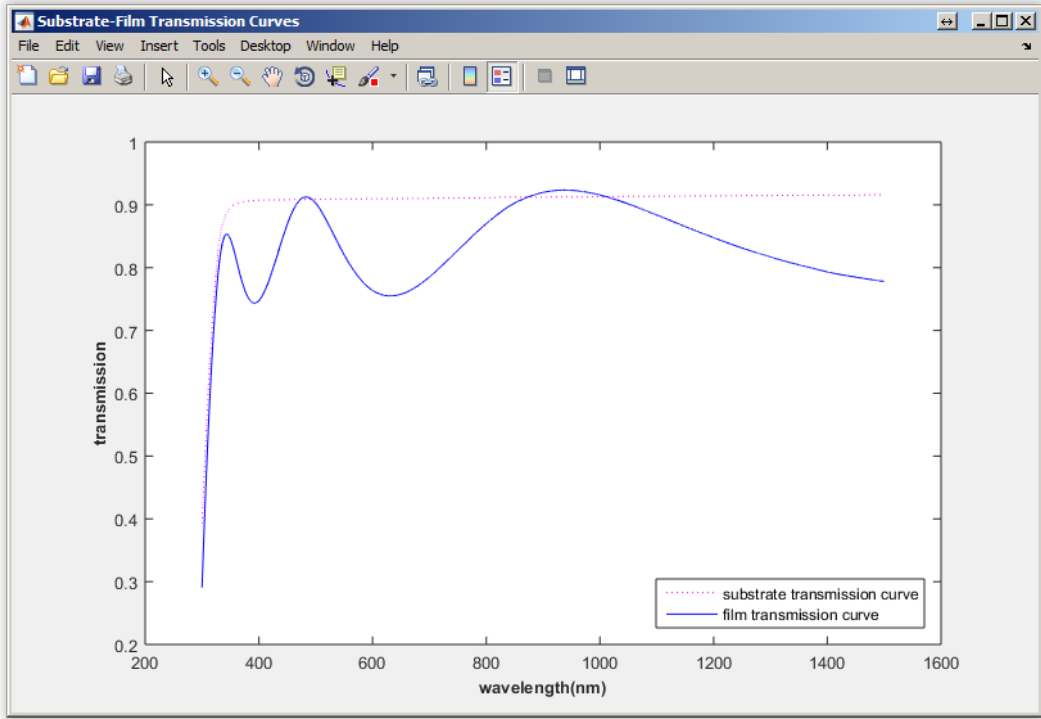
Şekil 3.22 Elde edilen verilerin kaydedileceği dosya adının verilmesi.

Aynı işlem "Data Save As (Verileri kaydet)" alanı altındaki ".xls" butonuna basılarak yapılırsa Şekil 3.24'deki gibi bir .xls dosyası oluşturulur.

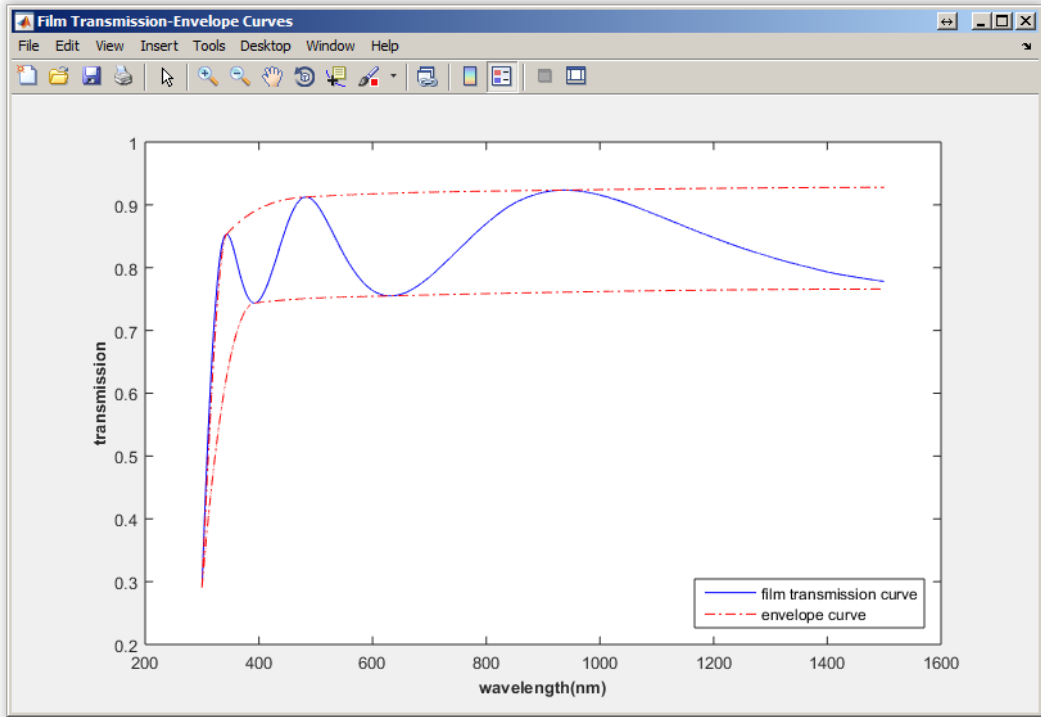
Elde edilen verilere ait grafikler de istenirse Şekil 3.25'deki gibi "Export Figures (Şekilleri Dışa Aktar)" butonuna basılır ve Şekil 3.26-3.30 arasındaki grafikler, arayüzün dışında, kaydedilebilir şekilde dışa aktarılır.



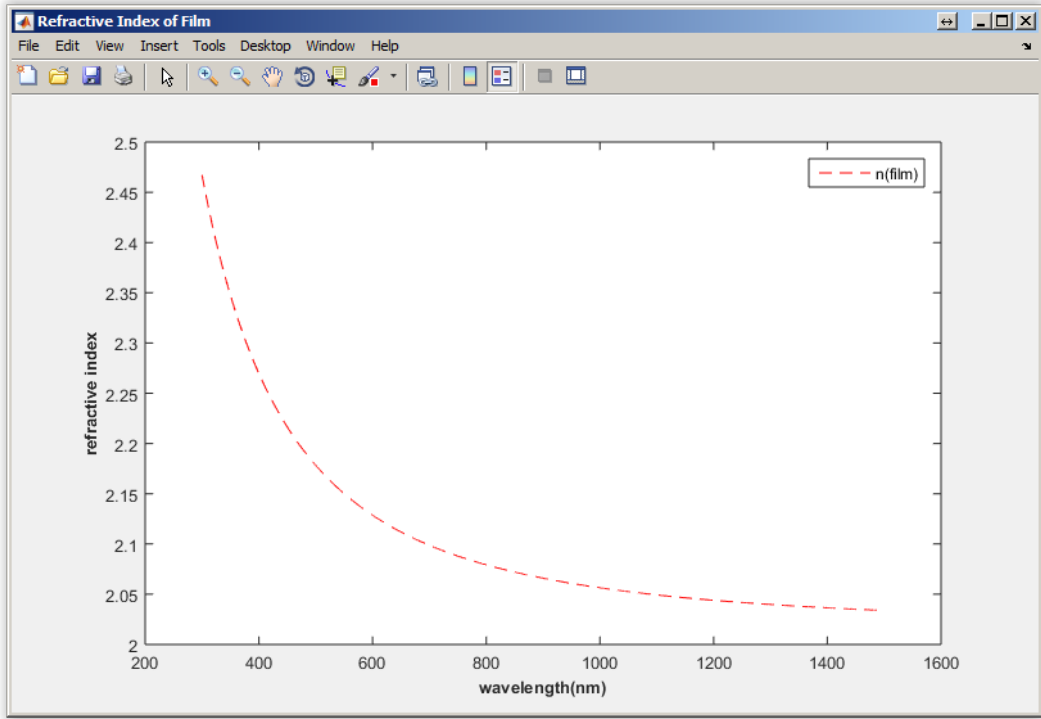
Şekil 3.23 Karakterizasyonda kullanılan ve elde edilen verilerin grafiklerini dışa aktarma butonu.



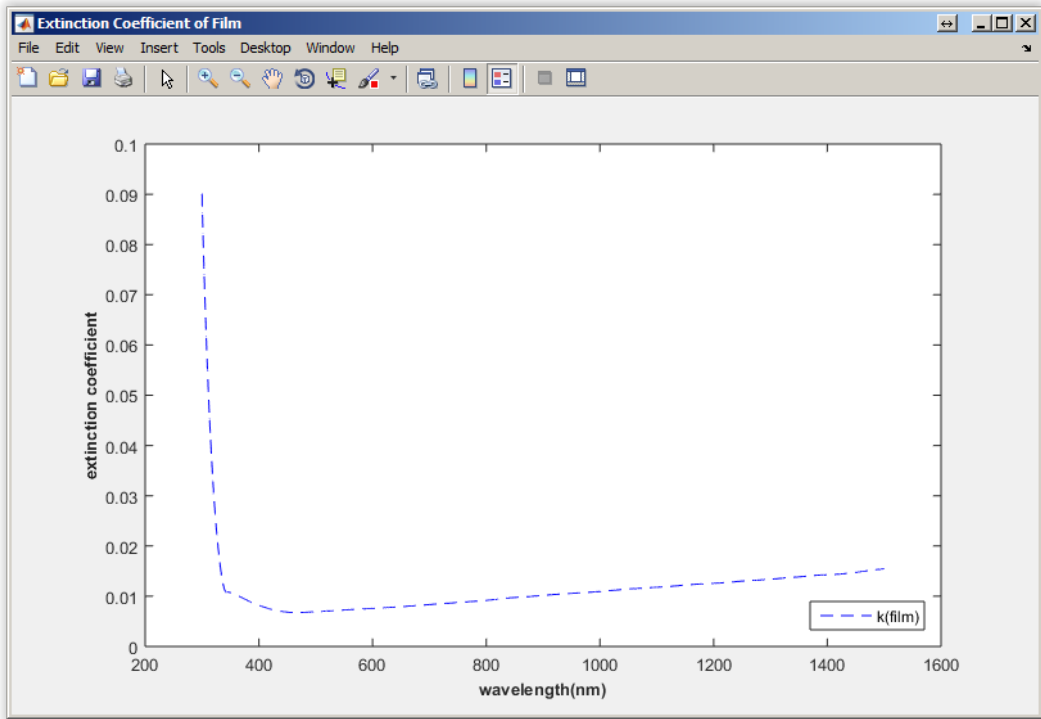
Şekil 3.24 Alttaş ve filme ait geçirgenlik spektrumu.



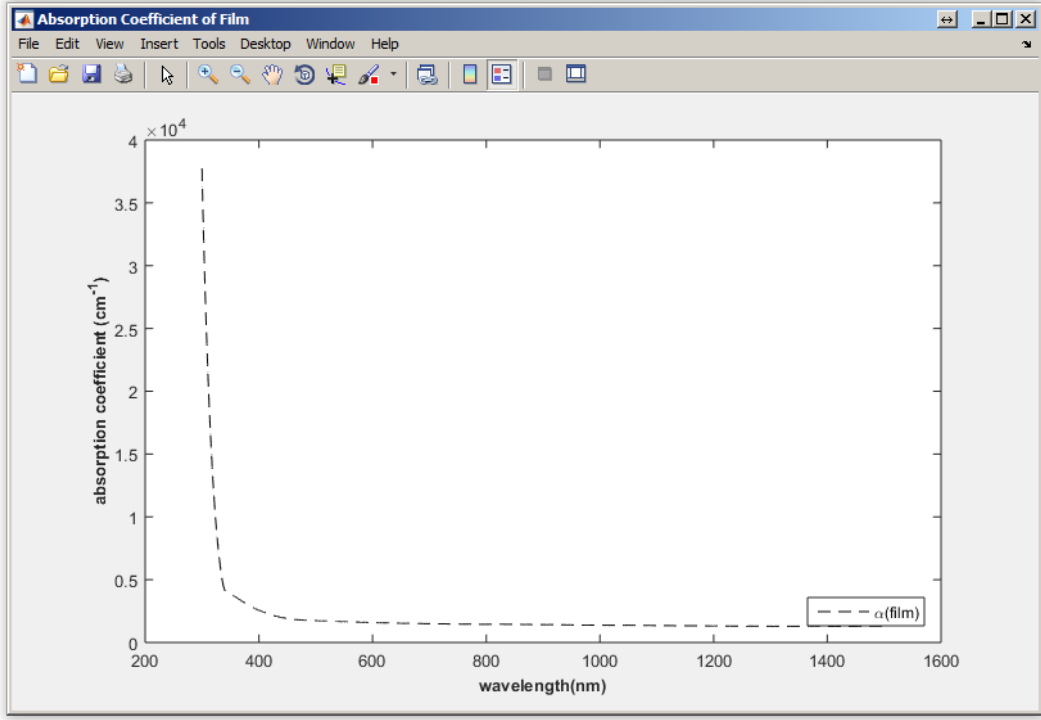
Şekil 3.25 Filme ait geçirgenlik spektrumu ve etrafında çizdirilen zarf eğrileri.



Şekil 3.26 Filme ait dalga boyuna karşı kırma indisi grafiği.



Şekil 3.27 Filme ait dalga boyuna karşı sönüm katsayısı grafiği.



Şekil 3.28 Filme ait dalga boyuna karşı soğurma katsayısı grafiği.

OPth programında, alttaşa yada filme ait geçirgenlik verisi dosyasının yeniden girilmesi ile ekranda gösterilen hesaplanmış film kalınlığı, optik bant aralığı değerleri ve grafik ekseninde çizdirilmiş tüm grafikler silinir ve "RUN (ÇALIŞTIR)" butonunun tekrar aktif olması ile karakterizasyon işlemine başlayabilecek duruma gelinir.

4. BULGULAR

Bu tez çalışması için hazırlanan OPth programından elde edilen çıktılar, incelenen ZnS ve Ta_2O_5 ince filmlerin kırma indisi (n), sönüm katsayısı (k), kalınlık (d) ve optik bant aralığı değerleri (E_g) açısından incelenecektir.

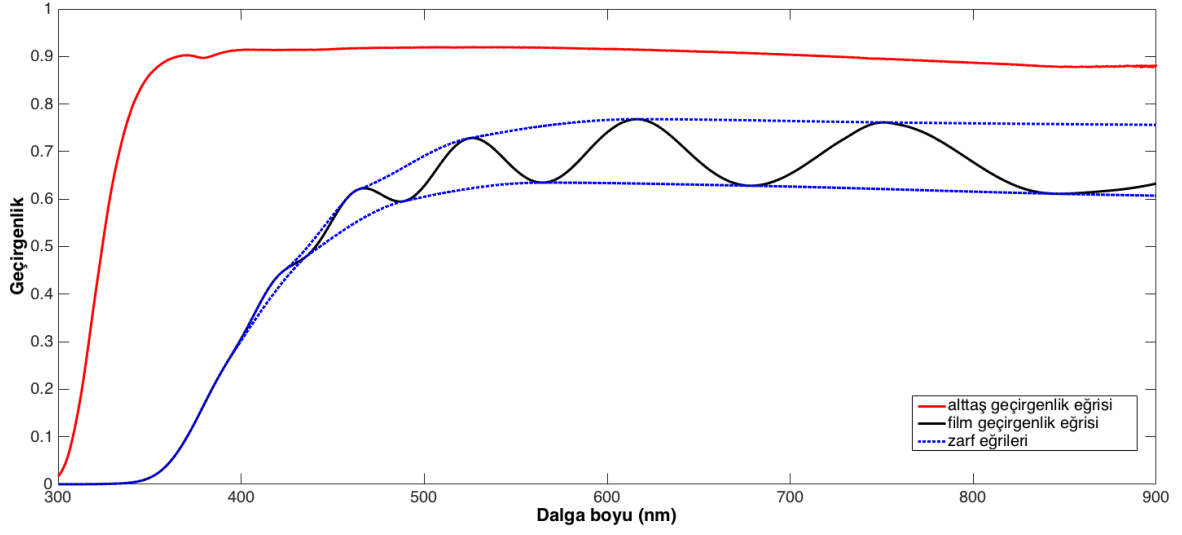
4.1. ZnS Filmler

Bu çalışmada incelenen ZnS filmler SNTG laboratuvarında, cam alttaş üzerine farklı kaplama parametrelerinde ve farklı kalınlıklarda büyütülmüştür. Büyütülen bu ZnS filmler kaplama parametrelerine göre Çizelge 4.1’de listelenmiştir. Filmlerin ve alttaşın geçirgenlik ölçümleri HITACHI U-3900 UV-VIS spektrofotometresi ile 300-900 nm dalga boyu arasında 0.1 nm aralıklarla yapılmıştır.

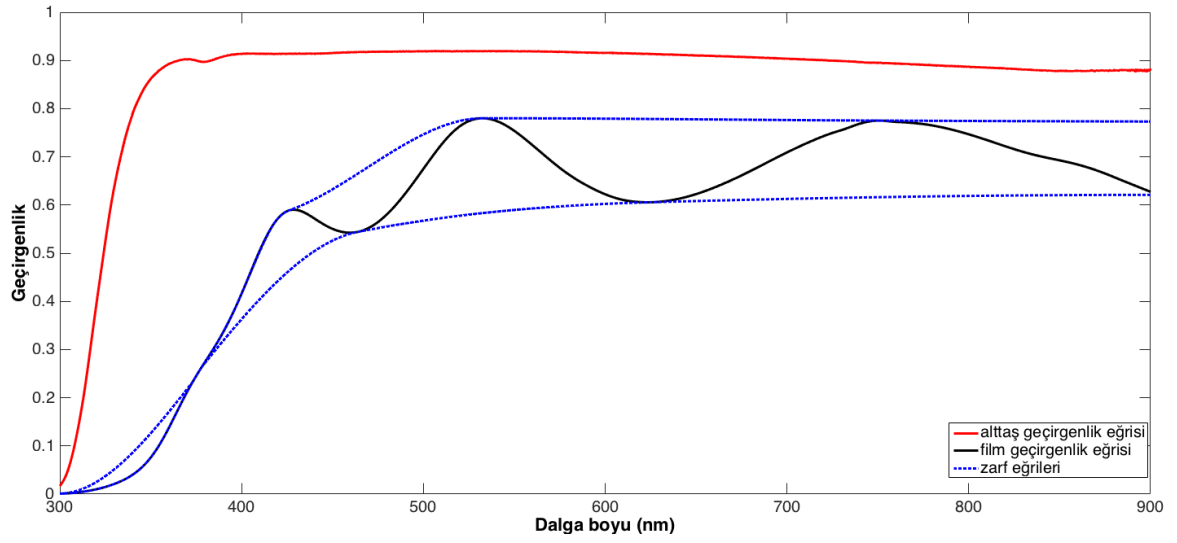
Çizelge 4.1 ZnS örneklerin büyütme koşulları

Örnek adı	ZnS-A	ZnS-B	ZnS-C	ZnS-D	ZnS-E
Kaplama süresi (dk)	90	35	45	110	45
Kaplama gücü (W)	100	125	125	75	125

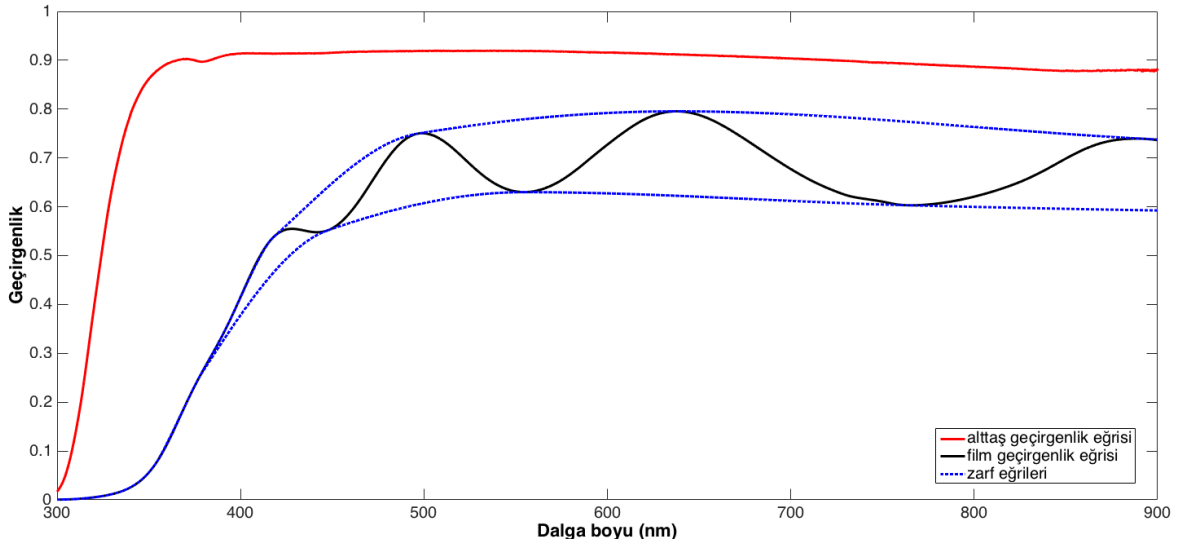
Alttaşa ve filmlere ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri Şekil 4.1-4.5’de verilmiştir.



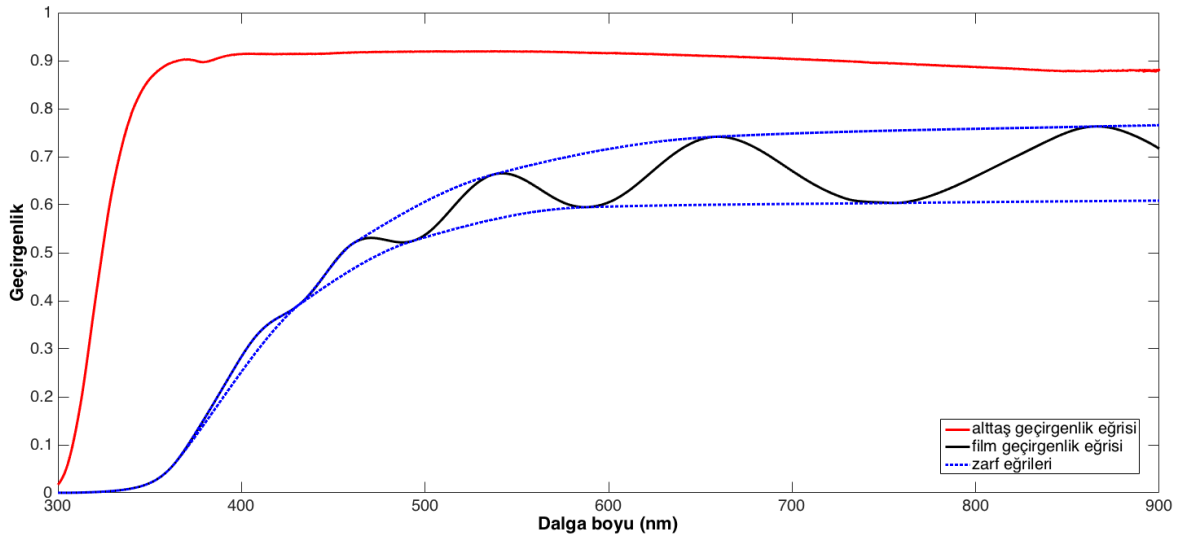
Şekil 4.1 ZnS-A örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.



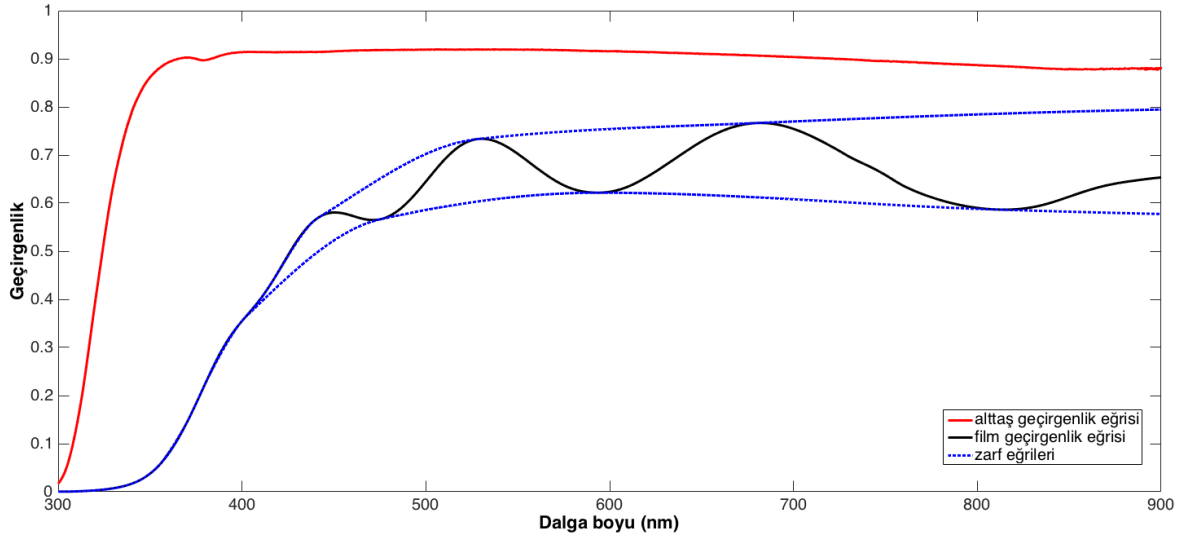
Şekil 4.2 ZnS-B örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.



Şekil 4.3 ZnS-C örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.



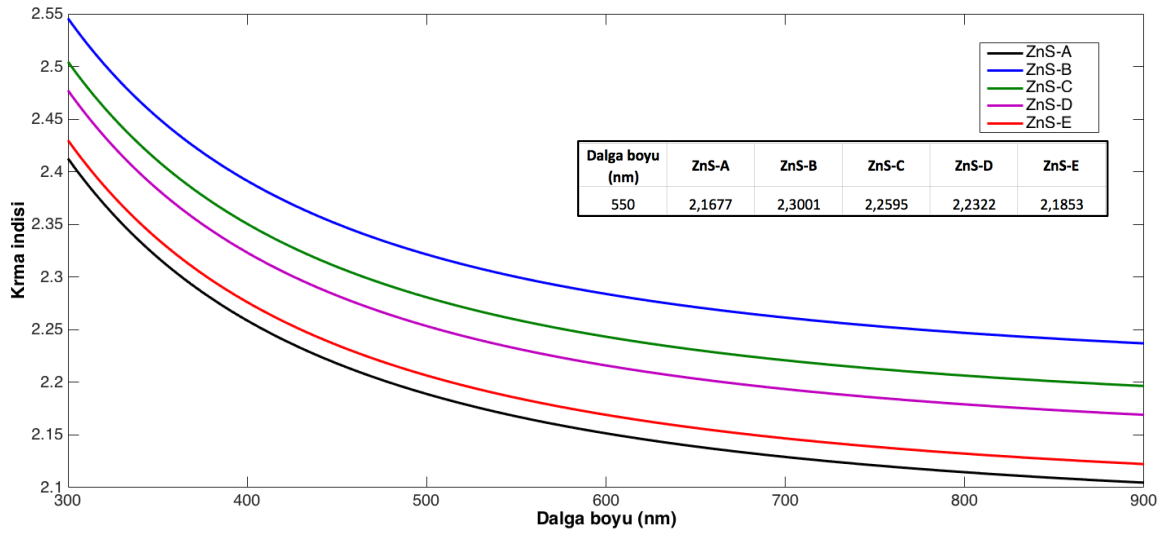
Şekil 4.4 ZnS-D örneğine ve cam alttaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.



Şekil 4.5 ZnS-E örneğine ve cam altaşa ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik örneği etrafında çizdirilen zarf eğrileri.

4.1.1. Kırma İndisi (n)

ZnS filmlerin OPth programı ile hesaplanan kırma indisi değerleri Şekil 4.6' da grafik ile ve bazı dalga boylarındaki değerleri Çizelge A.1' de liste ile verilmiştir.

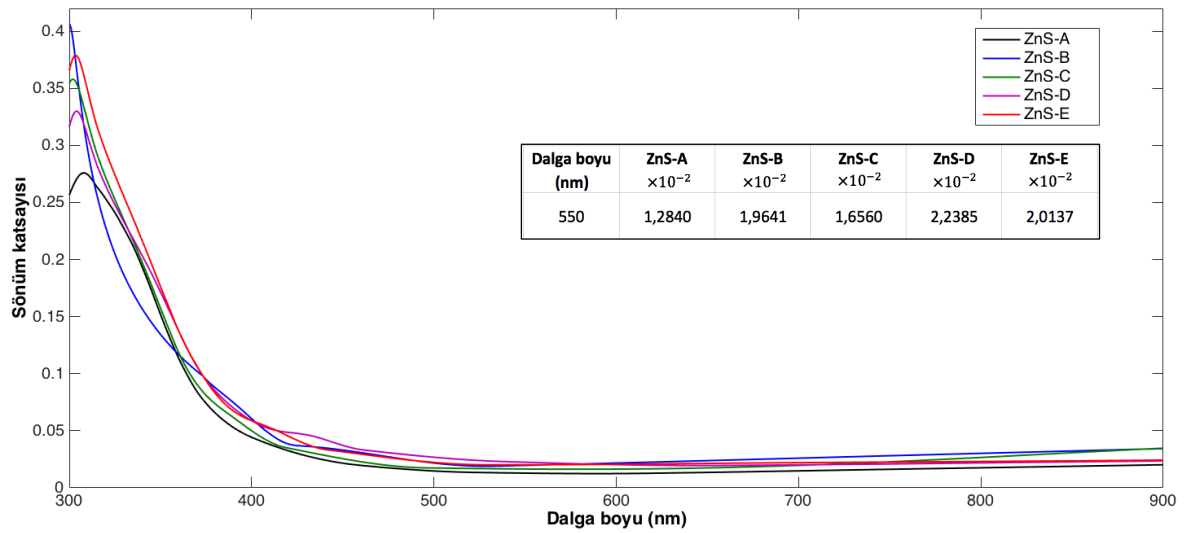


Şekil 4.6 ZnS örnekler için OPth programından elde edilen kırma indisi değerlerinin grafiği.

Farklı koşullarda üretilen *ZnS* filmler için bulunan bu kırma indisi değerleri, Márquez ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [32] bulunan 2.20 - 2.91 değerleri ile ve Kong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [33] bulunan 2.03 - 2.31 değerleri ile uyumlu görünmektedir.

4.1.2. Sönüm Katsayısı (k)

ZnS filmlerin OPth programı ile hesaplanan sönüm katsayısı değerleri Şekil 4.7' de grafik ile ve bazı dalga boylarındaki değerleri Çizelge A.2' de liste ile verilmiştir.



Şekil 4.7 *ZnS* örnekler için OPth programından elde edilen sönüm katsayısı değerlerinin grafiği.

Sönüm katsayısı için bulunan bu değerler de Márquez ve arkadaşları tarafından bulunan değerler [32] ile uyumlu görünmektedir.

4.1.3. Kalınlık (d) ve Optik Bant Aralığı (E_g)

ZnS örneklerine ait OPth programı ile bulunan kalınlık değerleri Çizelge 4.2' de verilmiştir. Bu değerler beklendiği gibi büyütme parametreleriyle uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.2 Farklı özelliklerde büyütülen ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen kalınlık değerleri.

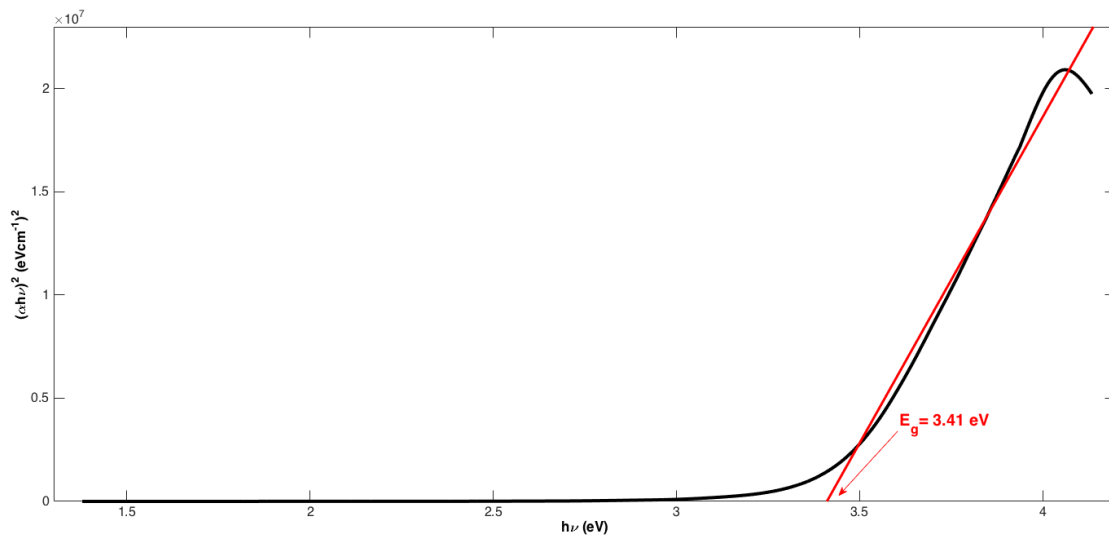
	ZnS-A	ZnS-B	ZnS-C	ZnS-D	ZnS-E
Kalınlık (nm)	747,09	384,97	471,57	596,46	484,93

ZnS örneklerine ait soğurma değerleri ile Tauc çizimi yöntemi kullanılarak optik bant aralığı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Çizelge 4.3' te ve Tauc çizimleri Şekil 4.8-4.12' de verilmiştir.

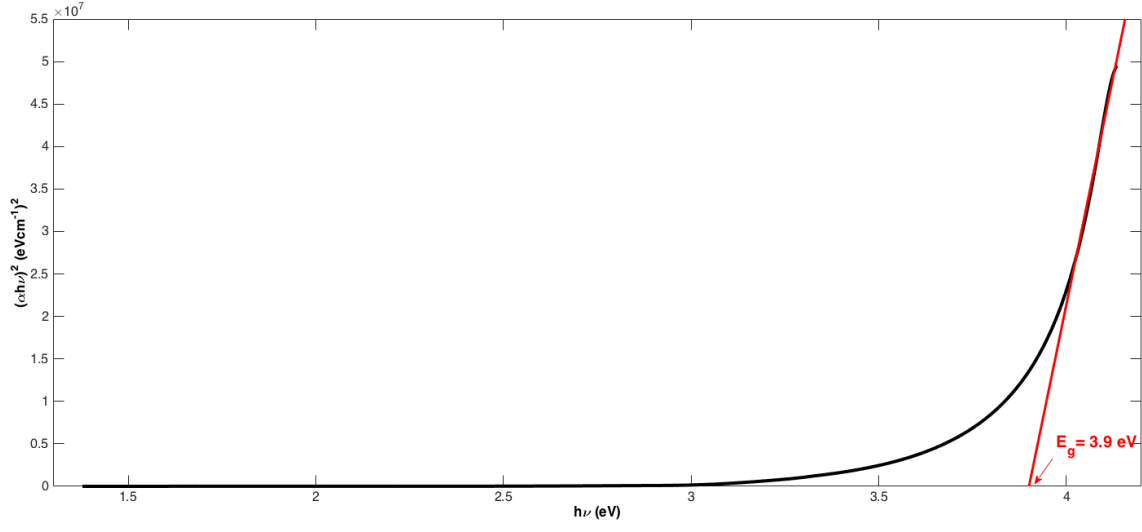
Çizelge 4.3 Farklı özelliklerde büyütülen ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen optik bant aralığı değerleri.

	ZnS-A	ZnS-B	ZnS-C	ZnS-D	ZnS-E
Optik bant aralığı (eV)	3,41	3,90	3,70	3,63	3,67

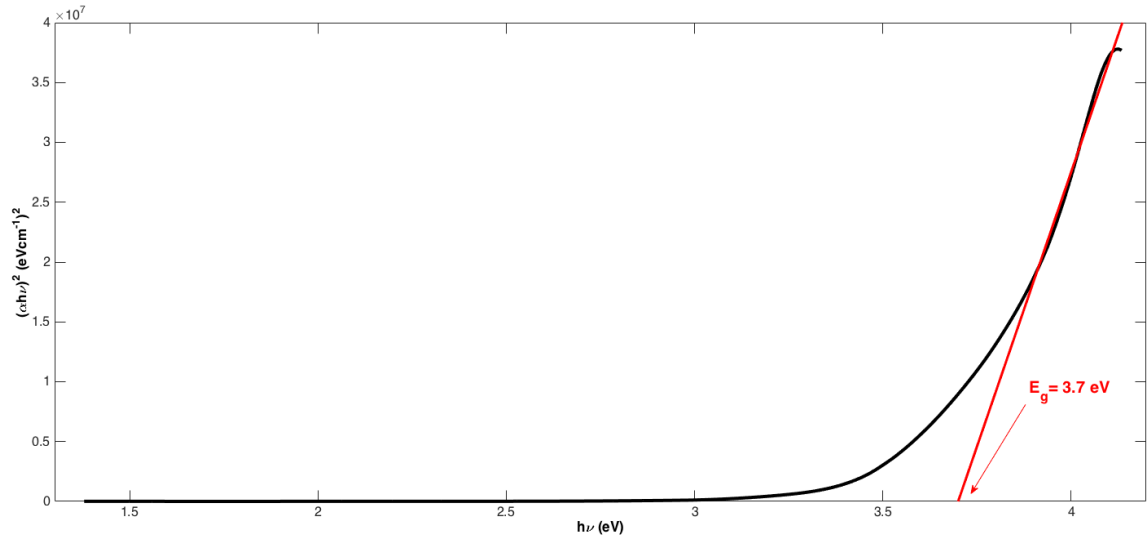
Optik bant aralığı değerleri Márquez ve arkadaşları tarafından bulunan [32] 3.33 – 3.49 eV değerleri, Kong ve arkadaşları tarafından bulunan [33] 3.16 – 3.39 eV değerleri ve Huwang ve arkadaşları tarafından bulunan [34] 3.45 – 3.79 eV değerleri ile uyumlu görünmektedir.



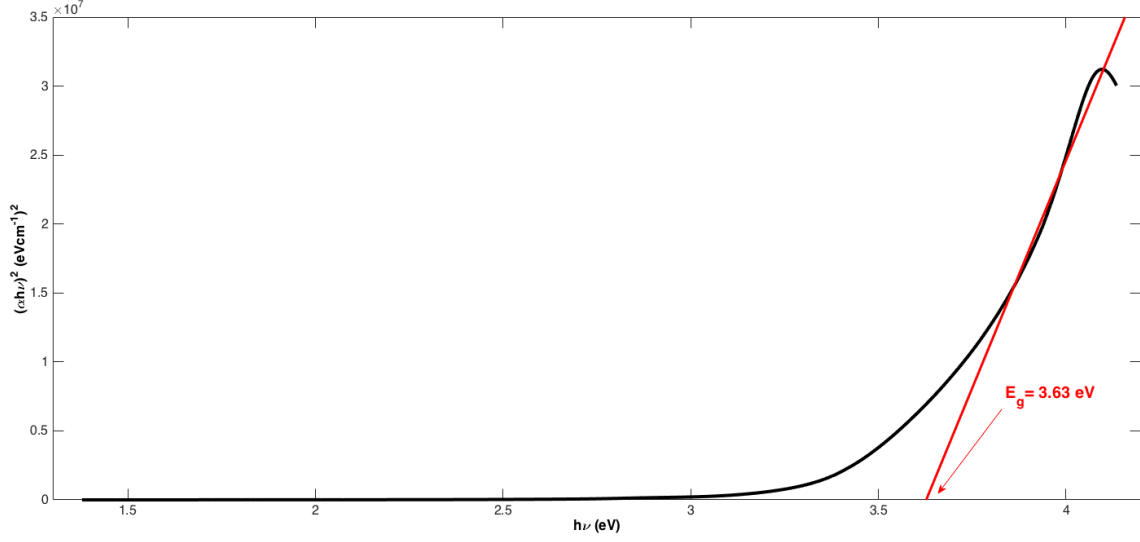
Şekil 4.8 ZnS-A örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.



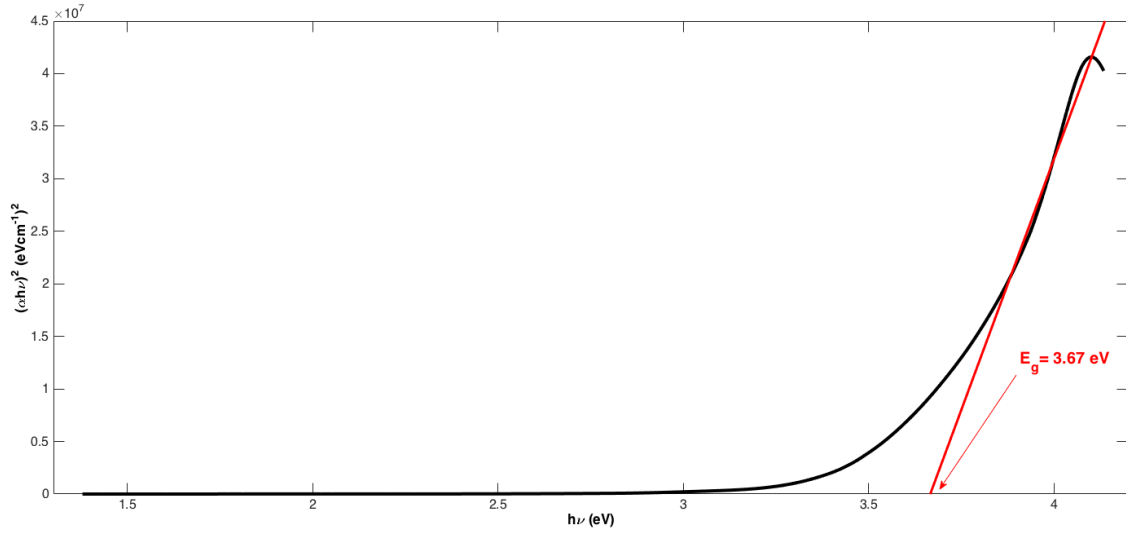
Şekil 4.9 ZnS-B örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.



Şekil 4.10 ZnS-C örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.



Şekil 4.11 ZnS-D örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.

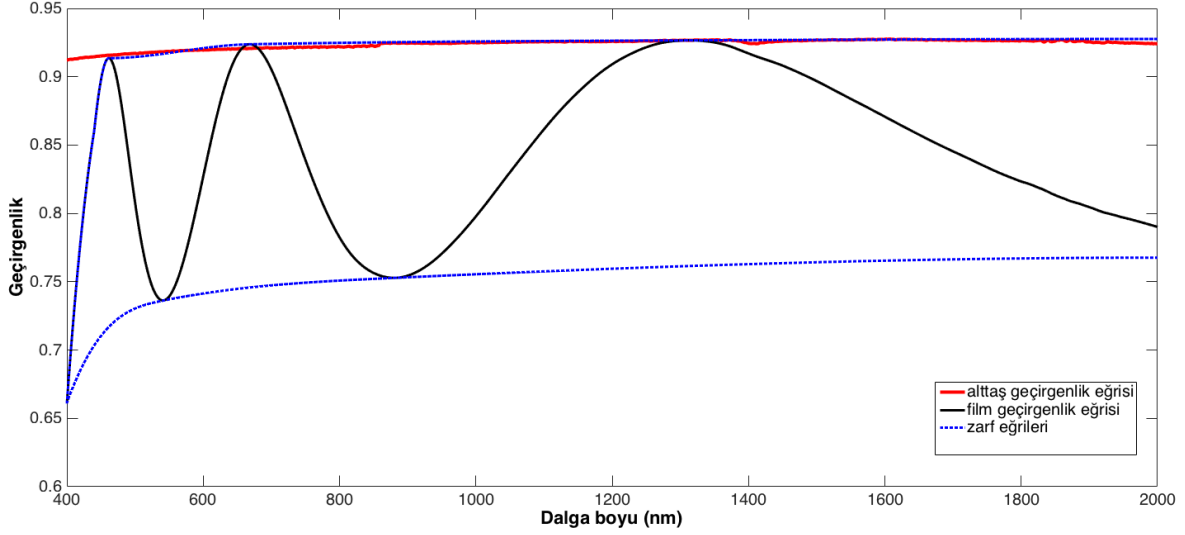


Şekil 4.12 ZnS-E örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.

4.2. Ta₂O₅ Filmler

Bu tez çalışmasında incelenen Ta₂O₅ filmler BK7 alttaş üzerine, Aselsan Opto-mekanik ekibi tarafından Aselsan tesislerinde hazırlanmıştır. Geçirgenlik ölçümleri PERKIN ELMER LAMBDA 950 UV/Vis/NIR spektrofotometre ile 401-1999 nm dalga boyu aralığında 2 nm aralıklarla alınmıştır.

BK7 alttaş ve Ta₂O₅ filme ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri Şekil 4.13' te verilmiştir.

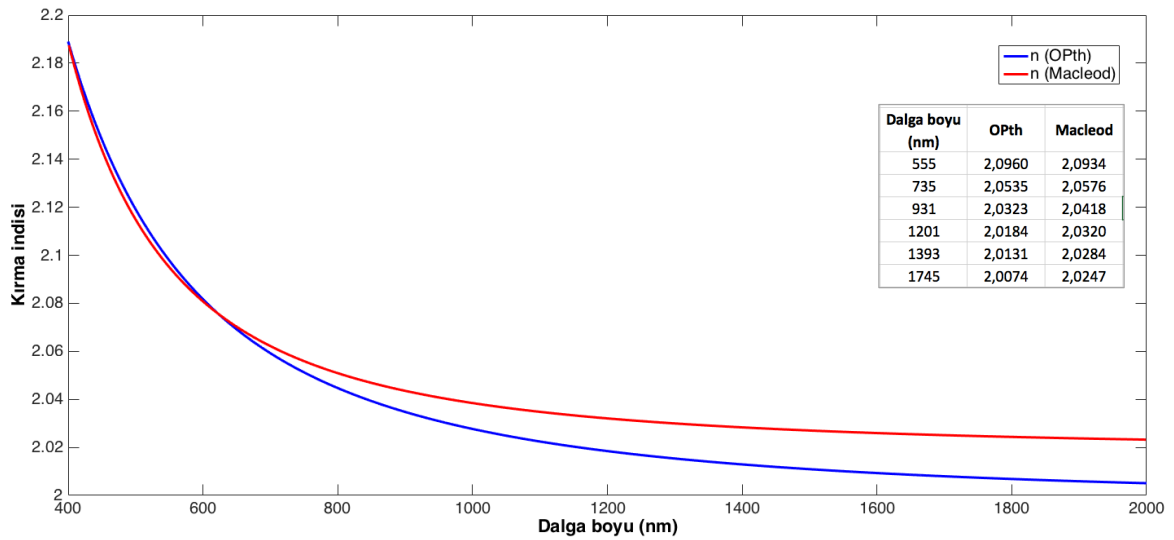


Şekil 4.13 BK7 alttaş ve Ta_2O_5 ince filme ait geçirgenlik eğrileri ve film geçirgenlik eğrisi etrafında çizdirilen zarf eğrileri.

OPth programı ile elde edilen kırma indisi, sönüm katsayısı ve kalınlık değerleri Essential Macleod ticari programı ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Kırma İndisi (n)

Ta_2O_5 örnek için OPth programı ile elde edilen kırma indisi değerlerinin, Essential Macleod programından elde edilen değerler ile karşılaştırması Şekil 4.14' te grafik ile, Çizelge B.1' da tablo ile verilmiştir.

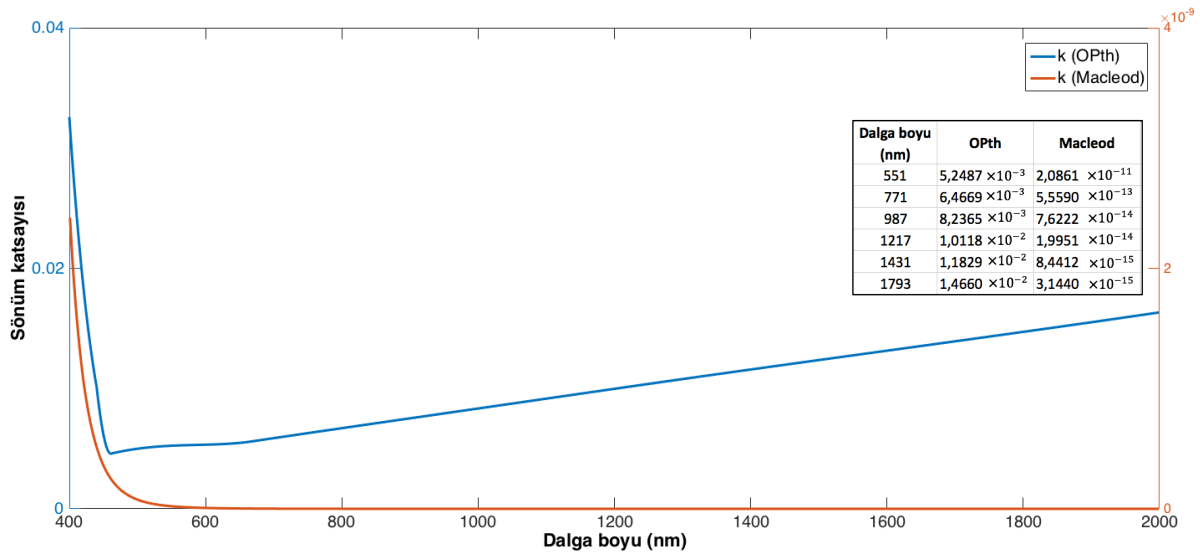


Şekil 4.14 Ta_2O_5 örnek için OPth programı ve Macleod programından elde edilen kırma indisi değerlerinin grafiği.

Hem OPth hem de Essential Macleod programları ile hesaplanan kırma indisi değerleri, Gao ve arkadaşları tarafından bulunan [23] 2.08 – 2.29 değerleri ile oldukça uyumludur.

4.2.2. Sönüm Katsayısı (k)

OPth programından elde edilen sönüm katsayısı değerlerinin, Essential Macleod programından elde edilen değerler ile karşılaştırması Şekil 4.15' te grafik ile, Çizelge B.1' de tablo ile verilmiştir.



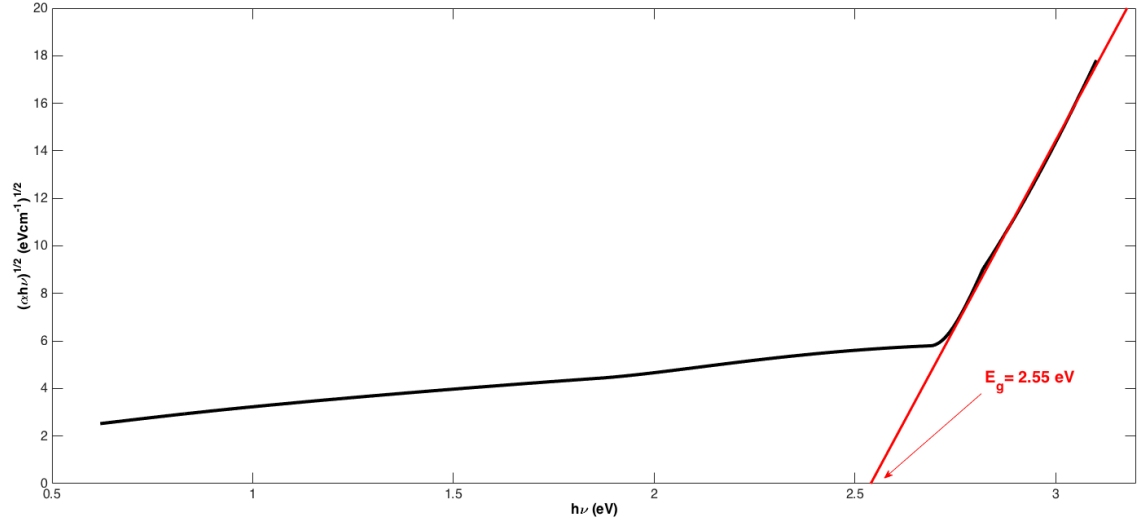
Şekil 4.15 Ta_2O_5 örnek için OPth programı ve Macleod programından elde edilen sönüm katsayısı değerlerinin grafiği.

Ayrıca Ta_2O_5 filmlerin sönüm katsayısı değerleri için literatürde [35][36] 10^{-3} - 10^{-4} değerleri de mevcuttur.

4.2.3. Kalınlık (d) ve Optik Bant Aralığı (E_g)

Ta_2O_5 örneğe ait OPth ve Macleod programları ile hesaplanan kalınlık değerleri sırasıyla 321.38 nm ve 323.23 nm olarak bulunmuştur.

Ta_2O_5 örneğe ait soğurma değerleri ile Tauc çizimi yöntemi kullanılarak optik bant aralığı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ve Tauc çizimleri Şekil 4.16' da verilmiştir.



Şekil 4.16 Ta₂O₅ örneği için çizilen Tauc eğrisi ve hesaplanan optik bant aralığı değeri.

5. SONUÇ

Swanepoel tarafından geliştirilen zarf modeli; cam alttaş üzerine kaplanmış, yüksek geçirgenlik gösteren ve girişim saçaklarından gerekli noktaların alınabileceği kalınlıklarda bir geçirgenlik spektrumu veren ince filmlerin kırma indisi, sönüm katsayısı ve film kalınlığı değerlerini belirlemede oldukça pratik ve doğru sonuçlar vermektedir.

Swanepoel modelinin uygulanmasında, geçirgenlik spektrumunun doğru zarflarını çizmek, filmin optik karakterizasyonunun doğruluğunu sınırlayan en önemli etkidir. Bu noktada Minkov tarafından önerilen algoritma ile hesaplanan ve geçirgenlik eğrisi üzerinde işaretlenen "sınır noktaları", "ek noktalar", "teğet noktaları" ve "yakınsama noktası" zarf eğrilerinin doğru çizdirilmesinde olumlu sonuç vermektedir. Bu noktaları hesaplamak için kullanılan algoritmada geçirgenlik spektrumu, geçirgenlik spektrumunun birinci ve ikinci türevi üzerinde işaretlenmesi gereken minimum ve maksimum noktaların bulunması gerekmektedir. Bu işlem için kullanılan algoritmada, her dalga boyundaki değer komşu iki değer ile farkına bakılmaktadır ve burada belirtilen minimum fark değeri de noktaların bulunmasında oldukça kritik rol oynamaktadır.

Zarf eğrilerinin çizilmesinden sonra hesaplanan kırma indisi değerleri Cauchy dispersiyon bağıntısı ile fit edilir. Elde edilen sonuçların doğruluğu için Cauchy fitine ait parametrelere verilecek başlangıç noktalarının doğru seçilmesi önem taşımaktadır. Özellikle üçüncü fit parametresi (λ^{-4} ile başlayan) spektrumun düşük dalga boylu bölgesinde etkili olduğu için fitin işleminde alınan sonucun spektrum boyunca gösterdiği davranışı doğrudan etkilemektedir.

Film kalınlık değerleri Swanepoel'in önerdiği iki yöntemle de hesaplanmış ve iki yöntemle bulunan sonuç da OPth programının ara yüzünde verilmiştir. Grafik yöntemin daha kolay olması ve doğru sonuçlar vermesi sebebi ile formül hesabı ile elde edilen değerler göz ardı edilmiştir.

Sönüm katsayısı hesabında Swanepoel, Manifacier ve Kar tarafından farklı modeller öne sürülmüştür. Bu modeller arasında Kar tarafından öne sürülen modelden alınan sonuçlar literatürle çok daha uyumlu bir görüntü çizmiştir.

Optik bant aralığı için yapılan hesaplamalarda Tauc eğrisini çizdirmek için geliştirilen algoritmada, $h\nu$ değerlerine karşı çizdirilen $(\alpha h\nu)^{1/m}$ değerlerinin artış gösterdiği yeri bulmak ve üzerine doğru çekmek gerekmektedir. Bu işlem için her $h\nu$ değerindeki $(\alpha h\nu)^{1/m}$ değeri komşu iki değerle karşılaştırılıp artışın başladığı doğru nokta bulunmaktadır. Ancak bu işlemde doğru noktayı bulabilmek için doğru bir fark değeri belirlemek önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında Swanepoel'in zarf modelini temel alarak geliştirilen OPth programı ile elde edilen karakterizasyon sonuçları profesyonel yazılımlar ile elde edilen sonuçlara ve literatürde verilen değerlere oldukça yakın çıkmaktadır. *ZnS* ince filmlerin OPth programı ile hesaplanan kırma indisi, sönüm katsayısı ve optik bant aralığı değerleri literatürle uyumlu bulunmuştur. OPth programı ile hesaplanan film kalınlıkları da beklendiği gibi büyütme parametreleri ile değişiklik göstermektedir. *Ta2O5* ve *Ta* ince filmler için OPth programı ile yapılan hesaplamalarda kırma indisi ve kalınlık değerleri profesyonel ticari Essential Macleod programının verdiği sonuçlarla oldukça yakın bulunmuş ancak sönüm katsayısı değerlerinde çok büyük sapmalar görülmüştür. Diğer taraftan literatürde *Ta2O5* ve *Ta* ince filmler için verilen değerler ile OPth programında alınan sonuçlar yakındır. *ZnS* filmler için hesaplanan optik bant aralığı değerleri literatürle uyumludur ancak *Ta2O5* ve *Ta* ince filmler için hesaplanan değerler, bu filmlerin geçirgenlik ölçümlerindeki dalga boyu aralığı UV bölgesine inmediğinden literatür değerlerinden farklı çıkmaktadır.

Geliştirilen OPth programı en basit modellerden biri olan Swanepoel modeli üzerine kurulmuştur. Ancak farklı malzemeler için kullanılan farklı optik modellerin OPth programına eklenmesi ile araştırmacıların ve mühendislerin ihtiyacına yönelik çalışan çok daha geniş kapsamlı bir program geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] C. Schaefer, G. Bräuer, and J. Szczyrbowski, "Low emissivity coatings on architectural glass," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 93, no. 1, pp. 37–45, 1997.
- [2] O. D. Coşkun, "Tam Yansıtıcı ve Hiç Yansıtmayan Çok Katmanlı Dielektrik Filmler," 2006.
- [3] K.-L. Ou, C.-C. Weng, E. Sugiarto, M. Ruslin, Y.-H. Lin, and H.-Y. Cheng, "Effect of nanostructured thin film on minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study in rat," *Surg. Endosc.*, vol. 30, no. 7, pp. 3035–3049, Jul. 2016.
- [4] D. Ravichandran, R. Roy, A. G. Chakhovskoi, C. E. Hunt, W. B. White, and S. Erdei, "Fabrication of Y₃Al₅O₁₂:Eu thin films and powders for field emission display applications," *J. Lumin.*, vol. 71, no. 4, pp. 291–297, 1997.
- [5] O. Stenzel, *Optical Coatings*, vol. 54. Springer Series in Surface Sciences, 2014.
- [6] J. C. Manifacier, J. Gasiot, and J. P. Fillard, "A simple method for the determination of the optical constants n , k and the thickness of a weakly absorbing thin film," *J. Phys. E.*, vol. 9, no. 11, pp. 1002–1004, 1976.
- [7] L. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime, "Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs," *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.*, vol. 8, no. 0, p. 13010, Jan. 2013.
- [8] D. Poelman and P. F. Smet, "Methods for the determination of the

- optical constants of thin films from single transmission measurements: a critical review," *J. Phys. D Appl. Phys*, vol. 36, no. 3, pp. 1850–1857, 2003.
- [9] O. Stenzel, *The Physics of Thin Film Optical Spectra*. Springer Series in Surface Sciences, 2005.
- [10] D. J. (David J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*. .
- [11] M. Fox, *Optical properties of solids*. Oxford University Press, 2001.
- [12] P. Taylor and A. I. Lvovsky, "Fresnel Equations," *Encycl. Opt. Eng.*, no. August, pp. 37–41, 2013.
- [13] G. R. Jafari, A. A. Saberi, R. Azimirad, A. Z. Moshfegh, and S. Rouhani, "The effect of annealing temperature on the statistical properties of WO₃ surface," *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, vol. 2006, no. 9, pp. P09017–P09017, Sep. 2006.
- [14] E. S. Machlin, "Materials Science in Microelectronics, The Relationships between Thin Film Processing and Structure," pp. 1–256, 2005.
- [15] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, 1991.
- [16] E. A. Irene, "Applications of spectroscopic ellipsometry to microelectronics," *Thin Solid Films*, vol. 233, no. 1, pp. 96–111, 1993.
- [17] M. Sardela, *Practical Materials Characterization*. 2014.
- [18] "Software Spectra Web Site." [Online]. Available: <http://www.sspectra.com/>. [Accessed: 28-Dec-2016].
- [19] "Home - Scientific Computing International." [Online]. Available: <http://sci-soft.com/>. [Accessed: 28-Dec-2016].

- [20] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, 4th ed. 2015.
- [21] E. Hecht, *Optics*. Addison-Wesley, 2002.
- [22] H. G. Tompkins and E. A. Irene, *Handbook of Ellipsometry*. William Andrew Publishing, 2005.
- [23] L. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime, "Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination," *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 1, pp. 501–509, 2011.
- [24] A. R. Forouhi and I. Bloomer, "Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics," *Phys. Rev. B*, vol. 34, no. 10, pp. 7018–7026, Nov. 1986.
- [25] R. Swanepoel, "Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon," *J. Phys. E.*, vol. 16, no. 12, pp. 1214–1222, 1983.
- [26] "FilmStar DESIGN." [Online]. Available: <http://www.ftgsoftware.com/design.htm>. [Accessed: 11-Jan-2017].
- [27] "THIN FILM CENTER: Optical Thin Film Excellence and Expertise." [Online]. Available: <http://www.thinfilmcenter.com/>. [Accessed: 11-Jan-2017].
- [28] O. S. Heavens, *Optical properties of thin solid films*. Dover Publications, 1991.
- [29] D. Minkov and R. Swanepoel, "Computerization of the optical characterization of a thin dielectric film," *Opt. Eng.*, vol. 32, no. 12, pp. 3333–3337, 1993.

- [30] G. M. Gavrilov, D. A. Minkov, E. Marquez, and S. M. F. Ruano, "Advanced Computer Drawing Envelopes of Transmittance Spectra of Thin Film Specimens," *Iarjset*, vol. 3, no. 9, pp. 163–168, 2016.
- [31] M. Kar, "Error minimization in the envelope method for the determination of optical constants of a thin film," *Surf. Interface Anal.*, vol. 42, no. 3, pp. 145–150, 2010.
- [32] A. M. A. E. Márquez, E. R. Shaaban, "Structural and optical properties of ZnS thin films," *Int. J. New Horizons Phys.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, 2015.
- [33] L. Kong, J. Deng, and L. Chen, "Structural and Optical Characterization of Magnetron Sputtered ZnS Thin Films Annealed in Different Atmosphere," *Chalcogenide Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 87–96, 2017.
- [34] D. H. Hwang, J. H. Ahn, K. N. Hui, K. S. Hui, and Y. G. Son, "Structural and optical properties of ZnS thin films deposited by RF magnetron sputtering," *Nanoscale Res. Lett.*, pp. 1–7, 2012.
- [35] M. S. Farhan, E. Zalnezhad, and A. R. Bushroa, "Properties of Ta₂O₅ thin films prepared by ion-assisted deposition," *Mater. Res. Bull.*, vol. 48, no. 10, pp. 4206–4209, 2013.
- [36] R. S. and R. R. Willey, "Optimization of Ta₂O₅ optical thin film deposited by radio frequency magnetron sputtering," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 20, pp. 5353–5357, 2016.

EKLER

A. ZnS Filmlerin Optik Sabitleri

Çizelge A.0.1 ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen kırma indisi değerleri

dalga boyu (nm)	n				
	ZnS-A	ZnS-B	ZnS-C	ZnS-D	ZnS-E
300	2,4126	2,5457	2,5045	2,4773	2,4299
319	2,3715	2,5045	2,4634	2,4361	2,3888
365	2,2980	2,4308	2,3898	2,3626	2,3154
410	2,2493	2,3819	2,3411	2,3138	2,2667
477	2,2011	2,3337	2,2929	2,2656	2,2187
519	2,1801	2,3126	2,2719	2,2446	2,1977
550	2,1677	2,3001	2,2595	2,2322	2,1853
594	2,1533	2,2857	2,2451	2,2177	2,1709
622	2,1457	2,2781	2,2375	2,2101	2,1633
685	2,1319	2,2642	2,2237	2,1963	2,1495
711	2,1272	2,2596	2,2190	2,1917	2,1449
768	2,1187	2,2510	2,2104	2,1831	2,1363
818	2,1126	2,2449	2,2043	2,1770	2,1302
865	2,1078	2,2401	2,1996	2,1722	2,1255
900	2,1047	2,2370	2,1965	2,1692	2,1224

Çizelge A.0.2 ZnS örnekler için OPth programı ile elde edilen sönüm katsayısı değerleri

dalga boyu (nm)	k				
	ZnS-A $\times 10^{-2}$	ZnS-B $\times 10^{-2}$	ZnS-C $\times 10^{-2}$	ZnS-D $\times 10^{-2}$	ZnS-E $\times 10^{-2}$
300	25,6466	40,6263	35,4215	31,6322	36,5438
319	25,5455	23,3377	27,5804	26,8073	29,8910
365	9,7875	10,9067	10,2983	12,0922	12,0823
410	3,7925	4,7235	4,0263	5,1679	5,2695
477	1,7204	2,6666	1,9292	3,0384	2,6047
519	1,3575	1,9236	1,6939	2,4461	2,0414
550	1,2840	1,9641	1,6460	2,2385	2,0137
594	1,2414	2,1417	1,6327	2,0477	2,0491
622	1,2804	2,2590	1,6675	1,9730	2,0901
685	1,4408	2,5302	1,8862	1,9886	2,1845
711	1,5135	2,6427	2,0241	2,0257	2,2134
768	1,6684	2,8840	2,4064	2,1227	2,2717
818	1,8004	3,0927	2,8053	2,2158	2,3232
865	1,9242	3,2881	3,1964	2,2975	2,3783
900	2,0156	3,4327	3,4699	2,3555	2,4278

B. Ta₂O₅ Filmin Optik Sabitleri

Çizelge 0.3 Ta₂O₅ örnek için OPth ve Macleod programları ile elde edilen kırma indisi ve sönüm katsayısı değerleri

dalga boyu (nm)	n		k	
	OPth	Macleod	OPth	Macleod
401	2,1880	2,1875	3,1732×10 ⁻²	2,4166×10 ⁻⁹
415	2,1751	2,1730	2,1691×10 ⁻²	1,3411×10 ⁻⁹
477	2,1314	2,1269	4,7811×10 ⁻³	1,4972×10 ⁻¹⁰
511	2,1139	2,1099	5,0735×10 ⁻³	5,6394×10 ⁻¹¹
551	2,0975	2,0947	5,2487×10 ⁻³	2,0861×10 ⁻¹¹
585	2,0861	2,0846	5,3124×10 ⁻³	9,9696×10 ⁻¹²
623	2,0755	2,0755	5,3783×10 ⁻³	4,8051×10 ⁻¹²
669	2,0651	2,0669	5,6154×10 ⁻³	2,2191×10 ⁻¹²
717	2,0563	2,0599	6,0188×10 ⁻³	1,1014×10 ⁻¹²
771	2,0483	2,0537	6,4669×10 ⁻³	5,5590×10 ⁻¹³
809	2,0436	2,0501	6,7798×10 ⁻³	3,6290×10 ⁻¹³
871	2,0373	2,0454	7,2879×10 ⁻³	1,9602×10 ⁻¹³
923	2,0329	2,0422	7,7131×10 ⁻³	1,2464×10 ⁻¹³
959	2,0303	2,0403	8,0075×10 ⁻³	9,3759×10 ⁻¹⁴
987	2,0285	2,0390	8,2365×10 ⁻³	7,6222×10 ⁻¹⁴
1041	2,0253	2,0368	8,6785×10 ⁻³	5,2760×10 ⁻¹⁴
1089	2,0229	2,0351	9,0717×10 ⁻³	3,9227×10 ⁻¹⁴
1133	2,0210	2,0338	9,4320×10 ⁻³	3,0561×10 ⁻¹⁴
1169	2,0196	2,0328	9,7265×10 ⁻³	2,5266×10 ⁻¹⁴
1217	2,0179	2,0317	1,0118×10 ⁻²	1,9951×10 ⁻¹⁴
1281	2,0159	2,0303	1,0637×10 ⁻²	1,4968×10 ⁻¹⁴
1313	2,0150	2,0297	1,0893×10 ⁻²	1,3102×10 ⁻¹⁴
1377	2,0134	2,0287	1,1403×10 ⁻²	1,0226×10 ⁻¹⁴
1431	2,0122	2,0279	1,1829×10 ⁻²	8,4412×10 ⁻¹⁵
1489	2,0111	2,0272	1,2284×10 ⁻²	6,9768×10 ⁻¹⁵
1509	2,0108	2,0269	1,2440×10 ⁻²	6,5553×10 ⁻¹⁵
1591	2,0094	2,0260	1,3079×10 ⁻²	5,1613×10 ⁻¹⁵
1633	2,0088	2,0257	1,3406×10 ⁻²	4,6091×10 ⁻¹⁵
1667	2,0084	2,0254	1,3671×10 ⁻²	4,2232×10 ⁻¹⁵
1723	2,0077	2,0249	1,4109×10 ⁻²	3,6844×10 ⁻¹⁵
1793	2,0069	2,0244	1,4660×10 ⁻²	3,1440×10 ⁻¹⁵
1825	2,0066	2,0242	1,4913×10 ⁻²	2,9360×10 ⁻¹⁵
1883	2,0060	2,0238	1,5377×10 ⁻²	2,6089×10 ⁻¹⁵
1919	2,0057	2,0236	1,5668×10 ⁻²	2,4331×10 ⁻¹⁵
1999	2,0051	2,0232	1,6327E-02	2,1026E-15

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Çağrı Köse
Doğum yeri : Ankara
Medeni hali : Bekar
E – posta : cagri.kose@mail.com
Adresi : Barbaros Mah. Güniz Sok. No:36/4 Çankaya-Ankara

Eğitim

Lise : Ankara Gazi Anadolu Lisesi (2001 - 2005)
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği (2007 - 2013)

Yabancı Dil ve Düzeyi : İngilizce, iyi

İş Deneyimi : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği İnce Film Hazırlama ve Karakterizasyon Laboratuvarı, Aselsan, Nurol Teknoloji, Space and Defence Technologies.

Deneyim Alanları : Saçtırma tekniği ile ince film hazırlama, spektrofotometre ve spektroskopik elipsometre ile ince filmleri optik özelliklerini ölçme ve optik karakterizasyonu. XRD ve AFM ölçümleri ve analizleri.

Tezden Üretilmiş Projeler ve bütçeleri : -

Tezden Üretilmiş Yayınlar : -

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar: -



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:25/07/2017

Tez Başlığı / Konusu: TEK KATLI İNCE FİLMLEİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN SWANPEOEL MODELİ İLE BELİRLENMESİ İÇİN YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam80..... sayfalık kısmına ilişkin, 25./07./2017 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafındanturnitin..... adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4.. 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar ~~hariç~~/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Çağrı KÖSE
Öğrenci No: N13220218
Anabilim Dalı: Fizik Mühendisliği
Programı:
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

Tarih ve İmza

25.07.2017

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç.Dr. Abdullah CEYLAN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)