

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem ÇETİN KARAKAYA

**KRAMERS-KRONİG DÖNÜŞÜMLERİ KULLANILARAK
YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN OPTİK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA,2014

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRAMERS-KRONİĞ DÖNÜŞÜMLERİ KULLANILARAK
YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN OPTİK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Gizem ÇETİN KARAKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

**Bu Tez .././2014 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.**

.....
Prof. Dr. Hamide KAVAK
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Ramazan ESEN
ÜYE

.....
Prof. Dr. Bilgehan GÜZEL
ÜYE

**Bu Tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:**

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

**Bu Çalışma Ç. Ü. Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FEF2013YL43**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KRAMERS-KRONİG DÖNÜŞÜMLERİ KULLANILARAK
YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN OPTİK PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Gizem ÇETİN KARAKAYA

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Hamide KAVAK
Yıl: 2014, Sayfa: 73

Jüri : Prof. Dr. Hamide KAVAK
: Prof. Dr. Ramazan ESEN
: Prof. Dr. Bilgehan GÜZEL

Kramers-Kronig dönüşümü, yansıma spektrumu verilerinden kırılma indisi ve sönüm katsayısının elde edilmesinde kullanılmakta olan sayısal bir metottur.

Kramers-Kronig (K-K) dönüşümleri Mat-Lab yazılımına adapte edilerek yarıiletken ince filmlerin optik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen yarıiletken ince filmlerin ölçülen yansıma spektrumlarından optik parametreler K-K dönüşümleri ile hesaplandı. Elde edilen teorik sonuçların deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu belirlendi.

AnahtarKelimeler: Kramers-Kronig Dönüşümleri, Yarıiletken, Optik Parametreler, Yansıma, Geçirgenlik

ABSTRACT

MSc. THESIS

DETERMINATION OF OPTICAL PARAMETERS FOR SEMICONDUCTOR THIN FILMS WITH KRAMERS-KRONIG RELATIONS

Gizem ÇETİN KARAKAYA

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS**

Supervisor : Prof. Dr. Hamide KAVAK
Year: 2014, Pages: 73
Jury : Prof. Dr. Hamide KAVAK
: Prof. Dr. Ramazan ESEN
: Prof. Dr. Bilgehan GÜZEL

The Kramers-Kronig transformations are numerical methods, that are useable to obtain refractive index and extinction coefficient from reflection spectra.

The Kramers-Kronig transformations were adapted to Mat-Lab Software and determined the optical parameters of semiconductor thin films.

The optical parameters of semiconducting thin films, which were produced in this study, were calculated from reflection spectra with K-K transformations. The calculated theoretical results were in good agreement with experimental data.

Key Words: Kramers-Kronig Relations, Optical Parameters, Semiconductor, Reflection, Transmission

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen bana her aşamada yol gösteren hocalarım Prof. Dr. Ramazan ESEN'e, Prof. Dr. Hamide KAVAK'a ve tüm bölüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Yalçın GÜLER'e, her aşamada yardımcı olan Deniz Kadir TAKCI, Kazım KARA'ya, deneysel aşamadaki yardımları için Necdet Hakan ERDOĞAN'a ve moral desteği için Merhan KILIÇ'a teşekkür ederim.

Hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini eksik etmeyerek bu günlere gelmemi sağlayan sevgili annem Seçil ÇETİN, babam Ahmet ÇETİN ile yanımda olan eşim Ediz KARAKAYA'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca tezimin desteklenmesini sağlayan Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no:FEF2013YL43) teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ.....	I
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Spektroskopi.....	1
1.2. Spektroskopi Çeşitleri	1
1.3. Optik Spektroskopi.....	2
1.4. Kramers-Kronig Dönüşümlerinin Önemi.....	4
1.5. Matlab Programı.....	4
1.5.1. Matlab'ın Genel Yapısı.....	4
1.5.2. Matlab Kullanımında Temel Kurallar	6
1.5.2.1. Değişkenler.....	6
1.5.2.2. Vektörler/matrisler	7
1.5.2.3. Yapılar	9
1.5.2.4. Fonksiyon kolları.....	10
1.5.2.5. Sınıflar	10
1.5.2.6. Grafik ve Grafikselle Kullanıcı Arayüzü Programı	10
1.5.2.7. Nesne Yönelimli Programlama	13
1.5.2.8. Diğer Dillerle Etkileşim	14
1.5.2.9. Lisans.....	14
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
3. MATERYAL VE METOD	21
3.1. Materyal.....	21
3.2. Deneysel Metod.....	22
3.2.1. ZnO İnce Filmin Üretilmesi	22
3.2.2. Karbon Filmlerin Üretilmesi	23
3.2.3. Yarıiletken İnce Filmlerin Optik Parametreleri.....	24

3.2.3.1. Kırılma İndisi Hesabı	25
3.2.3.1.(1). Elipsometri.....	25
3.2.3.1.(2). Işık ve Polarizasyon.....	26
3.2.3.1.(3). Maddeler	28
3.2.3.1.(4). Işık ve Madde Arasındaki Etkileşim.....	30
3.2.3.1.(5). Elipsometri Ölçümleri	32
3.2.3.1.(6). Data Analizi	34
3.2.3.1.(7). Film Kalınlığı.....	37
3.2.3.1.(8). Optik Sabitler.....	39
3.2.3.2. Soğurma Katsayısı.....	41
3.2.3.3. Yasak Enerji Aralığı.....	42
3.2.3.4. Optiksel Geçirgenlik.....	42
3.3. Teorik Metod.....	42
3.3.1. Spline Komutu.....	43
3.3.2. Ankor (Referans noktası, bağlantı) Pencere Metodu	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Kramers-Kronig Dönüşümleri.....	49
4.1.1. Matematiksel Temeller	49
4.1.2. Tepki Fonksiyonu.....	50
4.1.3. Rezidü Teoremi ve Hilbert Dönüşümü	52
4.1.4. Cauchy Değeri.....	54
4.1.5. Kramers - Kronig Dönüşümleri(σ, ϵ)	55
4.2. Program Çıktısı.....	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	67
EKLER	68
Ek 1: Oluşturulan Matlab Programı	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 1.1.	Basit bir spekrometre şeması çizimi.....	3
Şekil 1.2.	Sinüs fonksiyonu.	11
Şekil 1.3.	MATLAB'da GUI tasarım araçlarıyla (GUIDE) grafiksel kullanıcı arayüzleri	12
Şekil 1.4.	MATLAB'da GUI tasarım araçlarıyla (GUIDE) grafiksel kullanıcı arayüzleri 2	13
Şekil 3.1.	PFCVAD sisteminin şematik gösterimi.	22
Şekil 3.2.	Ortogonal dalga kombinasyonları ve polarizasyon çeşitleri	27
Şekil 3.3.	TiO ₂ için optik sabitler.....	29
Şekil 3.4.	TiO ₂ için kızılötesinden(düşük eV) morötesi'ne (yüksek eV) kadar dalga boylarını kapsayan karmaşık dielektrik fonksiyonu.	30
Şekil 3.5.	Işığın Snell yasasına göre yansıma ve kırılması.....	31
Şekil 3.6.	Bir ince filmde ışınların ara yüzlerden yansıması.	32
Şekil 3.7.	Tipik elipsometri gösterimi	33
Şekil 3.8.	Döndürme analiz elipsometre yapılandırması gelen polarizasyonu tanımlamak için bir polarizör ve örnekten gelen ışığı analiz etmek için bir döndürme polarizörü	34
Şekil 3.9.	Elipsometri data analizi için akım şeması	35
Şekil 3.10.	(a) MSE eğrisine karşı kalınlık grafiği 'küresel' minimumu gösterir. (b) Deneyisel eğriler ve karşılık gelen eğrileri küresel minimumu oluşturur. (c) Benzer bir eğri yerel minimum yakınlarında 0.45 mikron kalınlığında yanlış bir sonuçtan kolayca ayırt edilebilir	37
Şekil 3.11.	(a) Yansıma şiddeti (b) Silisyum üzerindeki 3 ince oksit için nanometre skalasındaki filmlerde deltanın yüksek hassasiyette yoğunluk ölçümü gözlenemez.....	38
Şekil 3.12.	Optik sabitler	41
Şekil 3.13.	1900-1990 arası nüfus artışının grafiği.....	45
Şekil 4.1.	Yarım daire boyunca integral.	53

Şekil 4.2. Referans amaçlı literatürden eklenen Si için $h\nu$ (enerji) - n (kırılma indisi) ve $h\nu$ (enerji) - k (sönüm katsayısı) grafiği	56
Şekil 4.3. Si için E (enerji) - n (kırılma indisi) grafiği	57
Şekil 4.4. Si için $h\nu$ (enerji) - k (sönüm katsayısı) grafiği.....	57
Şekil 4.5. Si için $h\nu$ (enerji) - α (soğurma katsayısı)	58
Şekil 4.6. Si için $h\nu$ (enerji) - ϵ (dielektrik fonksiyon) grafiği	58
Şekil 4.7. Referans amaçlı literatürden eklenen ZnO için λ (dalga boyu) - n (kırılma indisi) grafiği	59
Şekil 4.8. ZnO için λ (dalga boyu) - n (kırılma indisi) grafiği	59
Şekil 4.9. ZnO için λ (dalga boyu) - θ (faz açısı) grafiği.....	60
Şekil 4.10. ZnO için λ (dalga boyu) - ϵ (dielektrik fonksiyon) grafiği.....	60
Şekil 4.11. ZnO için λ (dalga boyu) - α (soğurma katsayısı) grafiği	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

K-K	: Kramers-Kronig
UV	: Ultraviyole
IR	: Kızılötesi
SE	: Spektroskopik Elipsometri
PFCVAD	: Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Tekniği
ECR-MP	: Elektron Siklotron Rezonans Mikrodalga Plazma Sistemi
h	: Planck sabiti

1. GİRİŞ

1.1. Spektroskopi

Spektroskopi en çok tanınan hali ile maddenin özelliklerinin, soğurulan ve salınan parçacıklar, ışık, veya ses aracılığı ile incelenmesidir. Ancak spektroskopinin esası bu değildir; çünkü spektroskopi ne kimyasal analize mahkûmdur, ne de kimyasal analizin tamamı spektrumsal analizden oluşmaktadır. Sonuçta spektroskopi fizik/fotonik/optik bazlı teknikler bütünüdür ve uygun düştüğü her yerde kullanılmaktadır; örneğin astrofizikte kullanılmaktadır, ancak maksat kimyasal analiz olmayabilmektedir.

Spektroskopi ayrıca ışık ile maddenin etkileşiminin incelenmesi olarak da tanımlanabilir. Spektroskopi, analitik kimyada ve moleküler biyolojide maddelerin ışık aracılığı ile tanımlanmaları amacıyla kullanılmaktadır. Tarihsel olarak sadece görünür ışık kullanılırken, günümüzde yeni yöntemler de kullanılmaktadır. Spektroskopik analiz yöntemlerinde örnek üzerine bir uyarıcı tanecik gönderilir ve örneğin bu uyarıcı taneciğe (elektron, nötron, proton, atom, molekül, gibi) karşı davranışı ölçülür. Bunlar dışında, elektromanyetik olan ve olmayan ışınlam da kullanılmaktadır (mikrodalgalar, radyo dalgaları, X ışınları, vs. gibi). Spektroskopik yöntemlerde maddenin elektromanyetik radyasyonu yayması, soğurması, saçması, saptırması, genel olarak maddenin elektromanyetik radyasyonla etkileşimi ve bu etkileşimin sonuçları analitik amaçlara dönük olarak incelenir. Spektroskopi, gökbilim ve uzaktan algılamada da ayrıca yoğun olarak uygulanan yöntemlerdendir.

1.2. Spektroskopi Çeşitleri

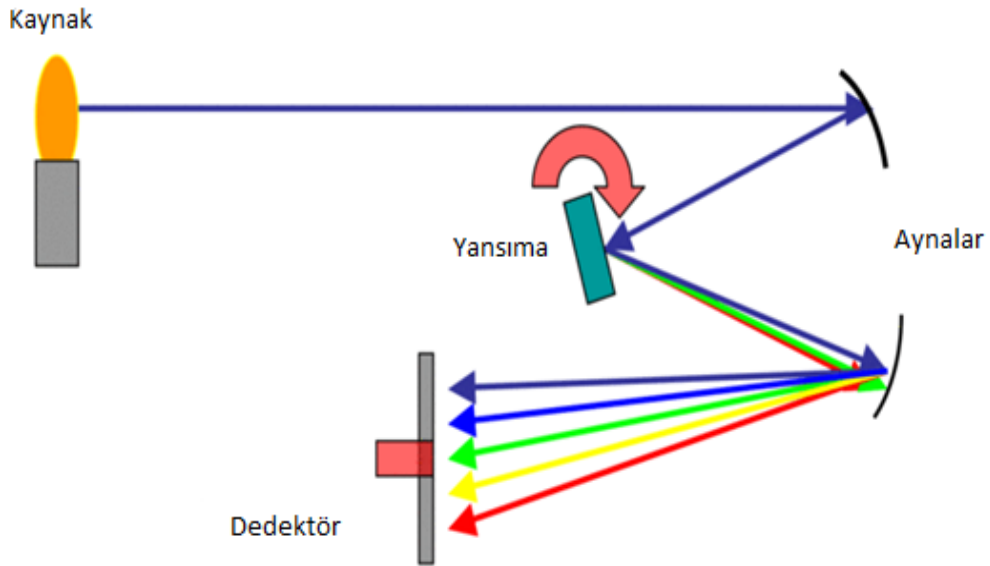
- Optik Spektroskopi
- Kızılötesi (infrared) Spektroskopi
- Morötesi (görünür, ultraviyole) Işık Spektroskopisi
- Raman Spektroskopisi
- Elektron Spin Rezonans (veya Elektron Paramanyetik Rezonans) Spektroskopisi

- Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi (NMR Spektroskopisi)
- Kütle Spektroskopisi
- Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)
- Atomik Emisyon Spektroskopisi
- Mössbauer Spektroskopisi

1.3. Optik Spektroskopi

Optik spektroskopi, optik materyal araştırmalarında önemli bir yöntemdir. Bu amaçla spektrometre kullanılır. Spektrometre (spektrofotometre, spektrograf veya spektroskop) ya da izgeölçer, elektromanyetik spektrumun belirli bir bölümü üzerinde ışığın özelliklerini ölçerek spektroskopik analiz yöntemiyle materyalleri belirlemek için kullanılan bir araçtır. Ölçülen değişken çoğunlukla ışığın yoğunluğudur ancak ışığın polarizasyon durumuna da bakılabilir. Bağımsız değişken ise genellikle ışık dalga boyu veya foton enerjisi ile doğrudan orantılı bir birimdir; dalga sayısı ya da elektron volt gibi. Spektrometre spektral çizgiler üretmek ve dalga boyları ve yoğunlukları ölçmek için spektroskopi amacıyla kullanılır. Spektrometre gamma ışınları ve X-ışınlarından uzak kızılötesi ışınlarına kadar çok geniş bir dalga boyu aralığı üzerinde çalışılan araçlar için kullanılan bir terimdir. Alet nispi birimler yerine mutlak birimlerin spektrumunu ölçmek için tasarlanmış ise o zaman spektrofotometre olarak adlandırılır. Spektrofotometrelerin büyük çoğunluğu görülebilir spektrum ve yakın spektral bölgelerinde kullanılmaktadır.

Genel olarak, belli bir alet spektrumun farklı kısımlarını ölçmek için kullanılan çeşitli teknikler nedeniyle bu toplam aralığının küçük bir bölümü üzerinde çalışacaktır. Optik frekansların altında (mikrodalga ve radyo dalgalarında olduğu gibi) ölçüm için spektrum analizörü özel elektronik bir cihazdır (Lucarini,2005).



Şekil 1.1. Basit bir spektrometre şeması çizimi (Kkmurray).

Dalga boyundan bağımsız spektrum farklı bileşenlerin analizinde en iyi ve en önemli araçtır. Spektrometreler temel araştırma laboratuvarlarının yanı sıra endüstriyel sektörde de kullanılır. Lineer ve lineer olmayan optik spektrumu ve bileşim materyallerini anlamak için harcanan çaba, optoelektronik devrelerin de gelişmesiyle birlikte ışık kaynakları ve detektör kullanılmaya başlanmıştır. Optik spektroskopi daha sonraları nanokompozitler gibi materyallerin endüstrinin ilgisini çekmesiyle birlikte stratejik mühendislik ve doğa bilimlerinde önemli bir hal almıştır.

Lineer optiğin özelliklerinin araştırılmasında, iyi bilinen bir spektroskopi tekniği Beer-Lambert yasasına dayanan iletim spektroskopi analizidir. Bu yöntemle materyal özelliklerini, yükseklik, genişlik ve bölgesel spektrum piklerini denetleyerek belirler. Diğer bir güvenilir yöntem ölçülen spektrumun temel bileşenlerinin analizidir. Ne yazık ki, bir deneysel analiz genellikle tüm optik özellikleri belirleyemez. Geçirgenlik spektrometresindeki yetersizlikten dolayı kırılma indisinin ölçülememesi örnek olarak verilebilir. Bu gibi durumlar için de teorik yöntemler geliştirilmiştir.

1.4. Kramers-Kronig Dönüşümlerinin Önemi

Kramers-Kronig (K-K) bağıntıları lineer optik bilgilerimizin genelleştirilmiş şekli olan temel teorik bir araçtır. Kramers-Kronig bağıntıları lineer optikte karmaşık fonksiyonların sanal ve reel kısımları arasındaki bağıntıdır. Reel ve sanal kısımlar birbirinden bağımsız değildir; aksine Hilbert dönüşümünün özel bir formu ile yani K-K ile birbirine bağlıdır. Genel kural olarak integral sonsuz spektrum aralığında alınır. Yansıma spektrumunda K-K bağıntıları yansımanın ölçülmesi ve faz açısıyla ilişkilendirilir. K-K dönüşümleri genel olarak lineer optik spektroskopisinde veri analizinde ve katı, gaz, moleküller ile sıvıların ölçülen spektrumundan faz bilgisini bulmada faydalanılır.

Ayrıca Kramers-Kronig dönüşümleri yüksek enerji fiziği, akustik, istatistik fizik ve sinyal yöntemleri gibi farklı alanlarla da ilişkilidir. Bu alanda yapılan çalışmalar elektronik devrelerin geliştirilmesiyle elektromanyetik radyasyon dedektörlerinin yarıiletken materyallerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Bu çalışmada Kramers-Kronig dönüşümlerinin uygulaması Matlab ile gerçekleştirilmiştir. Matlab kullanışlı ve fonksiyonel bir programdır.

1.5. Matlab Programı

1.5.1. Matlab'ın Genel Yapısı

Matlab; yüksek performanslı bir teknik programlama dilidir. Matlab açılımı İngilizce “MATrixLABoratory” den gelmektedir. Başlangıçta MATLAB özellikle mühendislik alanında, iyi grafik özelliklere sahip daha çok sayısal hesaplamalarda kullanılmak amacı ile geliştirilmiş bir paket programlama dili olarak ortaya çıkmıştır.

Matlab; matrix esaslı matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş etkileşimli bir paket programlama dilidir. İlk sürümleri Fortran diliyle hazırlanmış olmakla beraber son sürümleri (2000 yılı itibari ile 5.1) C dilinde yazılmıştır.

CleveMoler, New Mexico Üniversitesi'nde bilgisayar bilimi bölümünün başkanıydı, 1970'lerin sonunda MATLAB'ı geliştirmeye başladı. CleveMoler,

öğrencilerine öğretmek için LINPACK ve EISPACK'ı tasarlamıştır, bunların dışında Fortran programlama dilini de öğrencilerine öğretmiştir. Uygulamalı matematik, yakın bir zaman içerisinde diğer üniversiteler ve toplum içinde güçlü bir kitle tarafından benimsenmiştir. Moler, 1983 yılında Stanford Üniversitesi'ne yaptığı bir ziyaret sırasında Jack Little ile tanışmıştır. Ticari potansiyeli gören Steve Bangert da onlara katılmıştır. MATLAB'ı C ile tekrar yazmışlar ve geliştirmeye devam etmek için 1984'te MathWorks'ü kurmuşlardır. Yeniden yazılan kütüphaneler JACKPAC olarak bilinir. 2000'de, LAPACK matris işleme için yeni kütüphane kümeleri oluşturmak için MATLAB yeniden yazılmıştır.

MATLAB, ilk olarak kontrol mühendisliğindeki araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından kabul edildi. Ayrıca şuan eğitim alanında da kullanılmaktadır, özellikle doğrusal cebir, sayısal analiz öğretiminde ve görüntü işleme bilim adamları arasında popülerdir.

MATLAB mühendislik alanında;

- Matematik ve hesaplama işleri, algoritma geliştirme.
- Verilerin analizi, incelenmesi ve görüntülenmesi.
- Veri çözümleri ve
- Grafik işlemlerinde
- Modelleme, benzetim ve prototiplemede

kullanılabilecek genel amaçlı bir program olmakla beraber özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. Fortran ve C dili gibi yüksek seviyeli programlama dili ile yapılabilen hesaplamaların pek çoğunu MATLAB ile yapmak mümkündür. MATLAB 1970'lerin sonunda Cleve Moler tarafından yazılan Matlab programının tipik kullanım alanları:

- ❖ Matematiksel hesaplama işlemleri
- ❖ Algoritma geliştirme ve kod yazma
- ❖ Lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon, sayısal integrasyon vb. konularda matematik fonksiyonlar

- ❖ 2D ve 3D grafiklerinin çizimi
- ❖ Modelleme ve simülasyon (benzetim)
- ❖ Grafikselsel arayüz oluşturma
- ❖ Veri analizi ve kontrolü
- ❖ Gerçek dünya şartlarında uygulama geliştirme şeklinde özetlenebilir.

Matlab'ın resmi sitesi:

<http://www.mathworks.com>,

örnek uygulama ve teknik literatür için:

www.mathworks.com/applications/tech_comp...nicalliterature.html

Ayrıca <http://www.mathworks.com/matlabcentral/> kod paylaşımı

Matlab'ın Türkiye temsilcisi Bursa merkezli Figes firmasıdır. Web adresi:

<http://www.figes.com.tr>

Haber grubu: matlabturk@yahoogroups.com

1.5.2. Matlab Kullanımında Temel Kurallar

1.5.2.1. Değişkenler

Değişkenler, = atama operatörü kullanılarak tanımlanır. MATLAB zayıf ve dinamik tipli bir programlama dilidir. Zayıf tipli bir dildir çünkü tipler dolaylı olarak dönüştürülür. Dinamik tipli bir dildir çünkü değişkenler, değişken türü yazılmadan da atanabilirler, sembolik nesne olarak kabul edilip işlenirler ve tipleri değiştirilebilir. Değişkenler, sabitlerden, diğer değişkenlerin değerlerini içeren işlemlerden, ya da bir fonksiyonun çıkışından tanımlanabilir.

Örneğin:

```
>> x = 17
```

```
x =17
```

```
>> x = 'hat'
```

```
x =hat
```

```
>> y = x + 0
      y = 104      97      116
>> x = [3*4, pi/2]
      x = 12.0000  1.5708
>> y = 3*sin(x)
      y = -1.6097  3.0000
```

1.5.2.2. Vektörler/matrisler

MATLAB ile 1, 2 veya daha fazla boyutlarda dizileri oluşturup işleyebilirsiniz. MATLAB lehçesinde, bir vektör tek boyutlu bir matris anlamına gelir, diğer programlama dillerinde genellikle bir dizi olarak adlandırılır. Bir matris, genel olarak, 2-boyutlu bir dizi anlamına gelir, örnek vermek gerekirse, m ve n, 1'den daha büyük bir $m \times n$ dizisidir. İki den daha büyük boyuttaki diziler, çok boyutlu diziler olarak adlandırılır. Diziler, açık döngüler olmadan, temel tipli ve birçok standart fonksiyonları yerel olarak destekleyip işlemler yapılmasına izin verir. Bu nedenle MATLAB dili, aynı zamanda bir dizi programlama dili örneğidir.

Basit bir dizi şunlar kullanılarak tanımlanır:

Örneğin:

```
>> dizi = 1:2:9
      dizi = 1 3 5 7 9
```

Değişken ismi dizi olarak tanımlanır (veya yeni değeri dizi adında mevcut bir değişkene atar). Bu dizi 1, 3, 5, 7, ve 9 değerlerinden oluşur. Diğer bir deyişle, dizi 1 değeri (init değeri) ile başlar, her adımda ikişer ikişer (2) (increment değeri) artar, ve 9'a (terminator değerine) ulaştığında durur (ya da aşılmasını önler).

```
>> dizi = 1:3:9
      dizi = 1 4 7
```

1 değerini varsayılan değer olarak kullanmak için, increment değeri aslında bu sözdiziminin dışında bırakılabilir (kolonlardan biri ile birlikte).

```
>> ari = 1:5  
    ari = 1 2 3 4 5
```

1, 2, 3, 4 ve 5 değerlerini ari adındaki dizi değişkenine aktarır, varsayılan 'incrementer' (artırıcı) değeri 1'dir.

Matrisler, satır elemanları ile boşluk veya virgül ile ayırarak tanımlanabilir ve her satırı sonlandırmak için noktalı virgül kullanılır. Liste elemanları köşeli parantez ile belirtilmeli: Parantezler: () elemanları ve alt dizileri çağırır(bunlar, aynı zamanda, değişken listesini bağımsız bir işlem olarak belirtmek için kullanılır).

```
>> A = [16 3 2 13; 5 10 11 8; 9 6 7 12; 4 15 14 1]  
    A = 16  3  2 13  
        5 10 11  8  
        9  6  7 12  
        4 15 14  1
```

```
>> A(2,3)  
    ans = 11
```

Örneğin [2, 3, 4] indisi, "2:4" ifadesi ile belirtilebilir. Örneğin, bir submatrix, 2 satır 4 aracılığıyla ve 3 sütun 4 aracılığıyla şu şekilde yazılabilir:

```
>> A(2:4,3:4)  
    ans = 11  8  
         7 12  
        14  1
```

eye fonksiyonu kullanılarak n boyutlu bir kare birim matrisi oluşturulabilir, ve zeros ve ones fonksiyonları sırasıyla, boyutu sıfır ya da bir olan matrisler üretebilir.

```
>>eye(3)
ans = 1 0 0
      0 1 0
      0 0 1
>>zeros(2,3)
ans = 0 0 0
      0 0 0
>>ones(2,3)
ans = 1 1 1
      1 1 1
```

MATLAB standart "for" ve "while" döngülerini içerir, fakat (R'ye benzer uygulamalarda olduğu gibi), genellikle vektör notasyonunu kullanarak daha hızlı çalıştırmak için kod üretir.

1.5.2.3. Yapılar

MATLAB, yapısal veri tiplerine sahiptir. MATLAB dizilerindeki bütün değişkenlerden itibaren, daha uygun bir adı "structure array"dır, dizinin bütün elemanları aynı ada sahiptir. Buna ek olarak, MATLAB dinamik alan adlarını destekler (look-up alan adları, alan manipülasyonları, vb.). Fakat maalesef, MATLAB JIT (JustIn Time) MATLAB yapılarını desteklemez, bu yüzden çeşitli yapısal değişkenlerin sadece basit bir paketi bile maliyetli olacaktı.

1.5.2.4. Fonksiyon kolları

MATLAB, fonksiyon tanıtan kollar tarafından lambda-calculus elemanlarını veya referans fonksiyonlarını destekler, .m uzantılı ya da uzantısı olmayan dosyaları/yuvalanmış işlevleri, her ikisini de destekler.

1.5.2.5. Sınıflar

MATLAB birçok sınıfa sahip olmasına rağmen, söz dizimi ve arama kuralları diğer programlama dillerine göre farklı ve düzenlidir.

MATLAB, değişken sınıflarına ve referans sınıflarına sahiptir, sınıflar super-class olarak handleye sahip olabilir (referans sınıfları için) ya da olmayabilir (değişken sınıfları için).

Metot çağırma, ara değişken ve referans sınıflarından farklıdır. Örneğin, metot çağırma,

```
object.method();
```

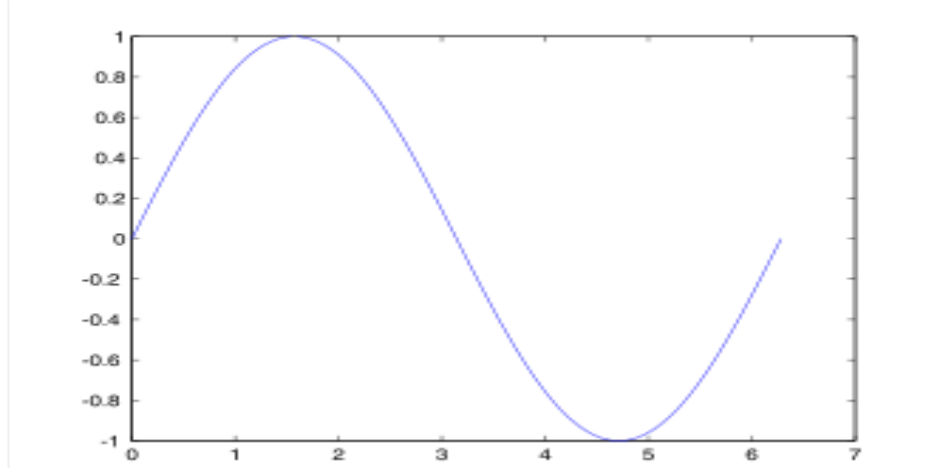
Referans sınıfının bir örneği olan object yalnızca kendisinin bir üyesini değiştirebilir.

1.5.2.6. Grafik ve Grafiksel Kullanıcı Arayüzü Programı

MATLAB, geliştirme uygulamalarıyla beraber grafiksel kullanıcı arayüzü özelliklerini de destekler. Ayrıca graph-plotting özellikleri de sıkıca entegre edilmiştir. Örneğin plot fonksiyonunda 2 vektör ile grafik üretilebilir. x ve y. Kod:

```
x = 0:pi/100:2*pi;  
y = sin(x);  
plot(x,y)
```

Ardından sinüs fonksiyonu ile şekiller üretilebilir:

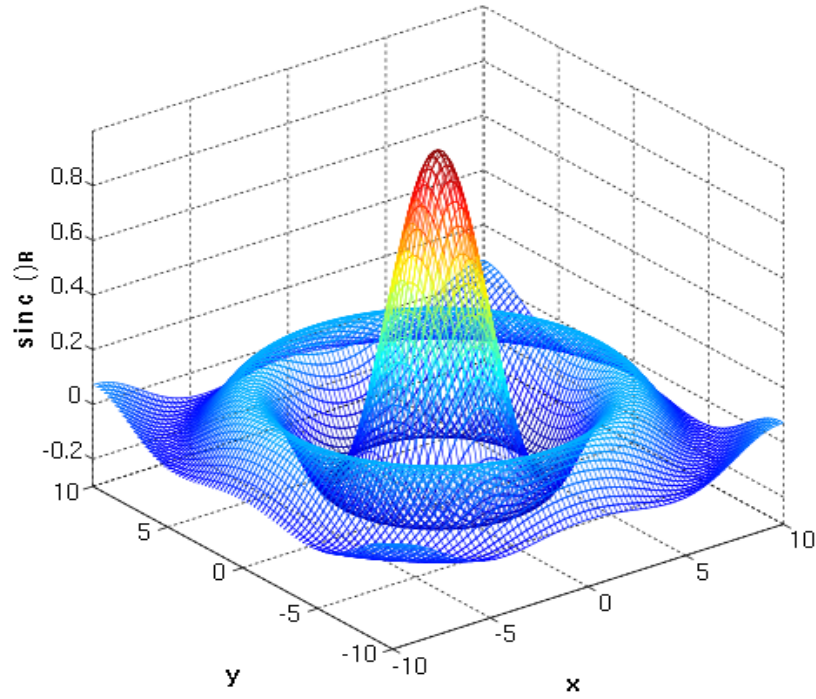


Şekil 1.2. Sinüs fonksiyonu.

MATLAB programı 3 boyutlu grafikler oluşturmak için surf, plot3 ya da mesh fonksiyonlarını kullanır.

```
[X,Y] = meshgrid(-10:0.25:10,-10:0.25:10);  
f = sinc(sqrt((X/pi).^2+(Y/pi).^2));  
mesh(X,Y,f);  
axis([-10 10 -10 10 -0.3 1])  
xlabel('\bfx')  
ylabel('\bfy')  
zlabel('\bfsinc ({\bfR})')  
hiddenoff
```

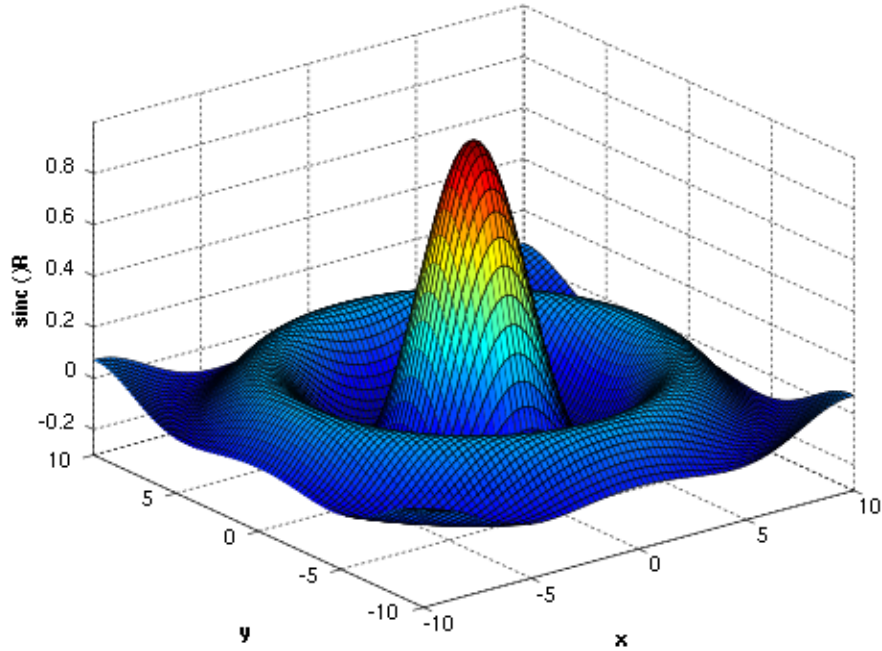
Bu kod sinüs fonksiyonu ile normalleştirilmemiş 2 boyutlu 3D wire frame grafiğini üretir:



Şekil 1.3. MATLAB'da GUI tasarım araçlarıyla (GUIDE) grafiksel kullanıcı arayüzleri. Smith, S. T. (2006).

```
[X,Y] = meshgrid(-10:0.25:10,-10:0.25:10);
f = sinc(sqrt((X/pi).^2+(Y/pi).^2));
surf(X,Y,f);
axis([-10 10 -10 10 -0.3 1])
xlabel('\bfx')
ylabel('\bfy')
zlabel('\bfsinc ({\bfR}))')
```

Bu kod sinüs fonksiyonu ile normalleştirilmemiş 2 boyutlu 3D surface grafiğini üretir:



Şekil 1.4. MATLAB'da GUI tasarım araçlarıyla (GUIDE) grafiksel kullanıcı arayüzleri 2. Smith, S. T. (2006).

1.5.2.7. Nesne Yönelimli Programlama

MATLAB'ın nesne yönelimli programlama için desteklediği sınıflar, inheritance, virtual dispatch, paketler, pass-by-value semantikleri, ve pass-by-reference semantikleridir.

```
classdef merhaba
methods
functiondoit(this)
disp('Merhaba!')
end
end
end
```

merhaba.m adlı bir dosyanın içine koyduğunuzda, aşağıdaki komutlarla çalışacaktır:

```
>> x = merhaba;  
>> x.doit;  
Merhaba!
```

1.5.2.8. Diğer Dillerle Etkileşim

MATLAB ile C programlama dili ya da Fortran'daki fonksiyonlar çağırılabilir ve altprogramlar yazılabilir. Çevirici bir fonksiyon MATLAB veri tiplerini geçişli ve devamlı olarak oluşturabilir. Bu şekilde derlenen fonksiyonlar tarafından oluşturulan dinamiksel yüklenebilir nesne dosyaları, "MEX-files" (MATLAB executable) olarak adlandırılır.

Java, ActiveX ya da .NET ile yazılan kütüphaneler, direkt olarak MATLAB'dan çağırılabilir ve birçok MATLAB kütüphanesi (örneğin XML ya da SQL desteği), Java veya ActiveX kütüphaneleri çerçevesinde wrapper olarak uygulanabilir. MATLAB'da, Java'dan çağırışım yapmak çok karmaşıktır, fakat MATLAB ile genişletilebilir, MathWorks tarafından ayrı olarak satılır, ya da JMI adlı belgelenmemiş bir mekanizma kullanılır (Java-to-MATLAB Interface), JMI, Java Metadata Interface ile karıştırılmamalıdır.

Alternatif olarak, Mathworks'un geliştirdiği, MuPAD tabanlı Symbolic Math Toolbox (Sembolik Matematik Araç Seti) kullanılabilir, MATLAB Maple ya da Mathematica ile bağlantı kurabilir. MathML giriş ve çıkışları için kütüphanelerin bulunması gerekmektedir.

1.5.2.9. Lisans

MATLAB, MathWorks şirketi tarafından tescilli bir üründür, bu yüzden kullanıcılar satıcıya mahkumdur. MATLAB Builder kütüphane dosyalarıyla

MATLAB fonksiyonları dağıtılıp, .NET veya Java uygulaması oluşturulabiliyor olmasına rağmen, ileriki gelişimi MATLAB diline bağlı olacaktır.

Her araç kutusu ayrı olarak satın alınmaktadır. Eğer değerlendirme lisansı talep edilirse, MATLAB değerlendirmesi için MathWorks satış birimi proje hakkında detaylı bilgi talep eder. Bir lisans edinmenin tüm süreçleri, para ve zaman şartlarından dolayı çok pahalıdır. Değerlendirme lisansı 2 veya 4 hafta içinde değerlendirilip verilir. MATLAB'ın öğrenci versiyonu da mevcuttur. Şikayet eden AB antitröst düzenleyicileri Mathworks'ün rakip lisansları satmayı reddedip reddetmediğini araştırıyor (wikipedia).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kramers-Kronig dönüşümleriyle ilgili Lovell'in Basic dilinde geliştirdiği program bulunmaktadır. Bu program sığanın reel kısmının direkt ölçülen verilerini frekansa bağlı iletkenliğe dönüştürmektedir. C' ve C'' dielektrik geçirgenliğin reel kısmı ve sanal kısmına aynı geometrik faktörle bağlanır. Sanal kısım ile reel kısım arasında iyi bir uyum bulunmuştur (Lovell, 1974).

K.Ohta ve H.Ishida bu alanda yaptığı çalışmalarla Maclaurin's formülü, trapezium formülü, Simpson's formülü ve Ardışık Çift Fourier dönüşümü yöntemlerini uygulayarak karşılaştırma yapmışlardır. RMS farkı ve CPU zamanına bakarak en uygun yöntemin Maclaurin's formülü ile uygulandığını bulmuşlardır (Ohta ve ark., 1988).

Bir alternatif metot ise, lineer optik sabitlerin King tarafından ortaya atılanıdır. Onun metodunda konjuge Fourier serisi uygulanır ve lineer optik sabitlerin simetri özelliklerinden faydalanılır. Buna benzer King'in bir başka metodu da lineer olmayan hassas noktaların reel ve sanal parçalarının, modüllerinin karelerinin yardımı ile uygulanır. Bu formalizm lineer olmayan raman'ın yorumlanmasında uygulanabilir. Lineer veri dönüşümüne ek olarak, dağılım bağıntıları lineer optik sabitlerin kurallarını ispatlamada ve lineer olmayan hassas noktalarda kullanılır. Bu çalışmada Kramers-Kronig bağıntılarını kurmada önemli olan temel matematik ve fiziksel koşullar göz önüne alınmıştır. Bazı teorik çizgi-form modelleri, bir sistemin özelliklerinin tanımlanması ve özelleştirilmesi ile elde edilen sonuçlardan Kramers-Kronig bağıntıları oluşturulmuştur (Peiponen ve ark., 1991).

Kramers-Kronig dönüşümleri üçüncü mertebede lineer olmayan optik duyarlılıkla elde edilmiştir. Lineer olmayan Raman spektroskopisi tekniklerinde K-K dönüşümlerinin mümkün uygulamaları tartışılmıştır (Kircheva ve ark., 1993).

Amsterdam'da Van Der Waals-Zeeman enstitüsünde yapılan bir çalışmada girişim ölçerler için transfer fonksiyonlarının kaynağındaki davranışı, akım ve faz arasındaki K-K dönüşümlerinde kullanımına olanak vermeyeceği belirtilip, transfer fonksiyonlarının sistematik bir açıklamasına yer verilmiştir. Bu çalışmada

frekansa bağlı yansıtmanın kompleks indisini içeren optik parametrelerin tümü gösterilmiştir. K-K dönüşümlerinin modifikasyonu akım ve faz için transfer fonksiyonların sıfırlanmasıyla tanımlanmıştır. Bir örnek olarak, bir Gires-Tournois girişim-ölçerinden alınan ışık yansıtmasındaki akımdan faz hesabı yapılarak, sayısal sonuçlar elde edilmiştir (Kop ve ark., 1995).

Diğer bir çalışmada K-K metodunun kızılötesi yansıtma spektrumunun analizinde kullanımına ilişkindir. Dikkatlice uygun sınır koşullarında uygulandığında, yansıtma spektrumunun küçük bir bölgesinden elde edilen veriler kesin ve kullanışlıdır. Bilhassa çalışılan bölgenin yüksek ve düşük enerji sınırlarının düşük soğurma bölgelerinde radyasyonun yansıtması üzerinde hesaplanan faz değişimini minimuma düşürerek sınır koşullarının nasıl kullanılacağını göstermiştir. Kızılötesi yansıtıcılık ammonium chloride ve bromide için spektrum aralığı $1000-1700 \text{ cm}^{-1}$ arasındadır. Gözlemlenen yansıtma spektrumundan bir frekans duyarlılığı hesaplanmıştır (Abdullah ve ark., 1996).

Sıtkı Eker, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yaptığı yüksek lisans tezinde Kramers-Kronig dönüşümleri için nümerik integrasyon metotlarından biri üzerinde çalışmış ve Kramers-Kronig dönüşümlerini analitik olarak sağlayan bir fonksiyonu referans seçerek Maclaurin's formülü için Fortran dilinde bir bilgisayar programı yazmıştır. Elde edilen sonuçlardan, nümerik Kramers-Kronig dönüşümü ile analitik yoldan elde edilen verilerin çok iyi bir uyum içinde olduğunu belirlemiş ve ayrıca bu dönüşümün geçerli olduğu frekans aralıkları da ilk defa tarafından belirlenmiştir (Eker, 1997).

Bir diğer çalışmada Kramers-Kronig analizi yansıtma-soğurma spektroskopisi için ince film yaklaşıklığı ve girişim etkisi ile geliştirilmiştir. İnce filmin yansıtma-soğurma spektrumu 10nm 'den daha azdır. Kompleks yansıtma indisindeki veriler, Kramers-Kronig analizi ile bulunan yansıtma-soğurma spektroskopisi ile benzeşmiştir (Yamamoto ve ark.,1997).

Kramers-Kronig dönüşümleri ve bariyer etkileşim problemi üzerine yapılan bir çalışmada iki karakteristik etkileşim zamanı $\tau_1(\omega)$ ve $\tau_2(\omega)$ klasik elektromanyetik dalgaların keyfi ve birbirinden bağımsız nicelikler olmadığı,

Kramers-Kronig dönüşümleri tarafından reel ve sanal bileşenlerinin bağlı olduğu görülmüştür. Makroskopik kurallara karşılık gelen kompleks zamanı ispatlanmıştır. Etkileşim zamanı problemi ile sığalı elektriksel devreler arasındaki benzerlik ve bileşenlere bağlı iletim frekansı tespit edilmiştir (Gasparian ve ark., 1998).

Bir diğer çalışma Kramers-Kronig dönüşümlerinin polisilan üzerindeki üçüncü harmonik oluşum uygulamasıdır (Lucarini ve ark., 2003).

Ebru Şenadım, Sıtkı Eker, Hamide Kavak ve Ramazan Esen tarafından bu konuda çalışmalar yapılmış olup “Atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi ile üretilen ZnO ince filmin optik ve yapısal parametreleri” adlı makalede yayımlanmıştır. Bu çalışmada, bu yöntemle üretilen ZnO filmlerin soğurma katsayısı α , kırılma indisi n , enerji band aralığı E_g ve dielektrik sabitler farklı metotlarla bulunmuştur. Kramers-Kronig ve dağılım bağıntıları kompleks kırılma indisi ve dielektrik sabitleri hesaplamada ultraviyole-görünür bölgelerindeki yansıma verilerinden faydalanılmıştır. Dielektrik katsayı spektrumu da enerji bant aralığını hesaplamada kullanılmış ve 3.24 eV olarak bulunmuştur. Deneysel enerji bant aralığı ise 357 nm kalınlığındaki ZnO ince film için 3.22 eV olarak bulunmuştur. Bu metodun geliştirilmesiyle de kırıcılık indisi bulundu ve K-K dönüşümleri ile bulunan sonuçlarla uyumlu olduğu görüldü. İnce filmin analizi X-ışını kırınım ölçeri ile yapıldı (Şenadım ve ark., 2006).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Yarıiletkenler, önce saflıklarına göre, saf ve saf olmayan yarıiletkenler olmak üzere ikiye ayrılır. Saf iletkenler, içinde safsızlık maddesi bulunmayan katılardır.

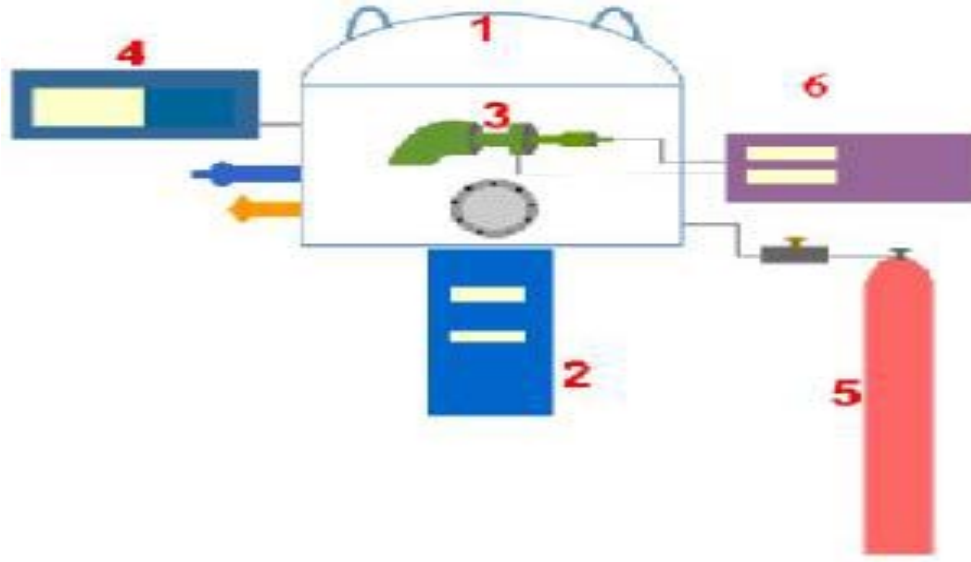
İletkenlik bandındaki elektron sayısı, değerlik bandındaki deşik sayısına eşittir. Örneğin, Si da bu sayı yaklaşık olarak cm^3 başına 10^{10} , Ge da ise 10^{13} kadardır. Saf Si ve Ge un özdirençleri de yüksektir.

İçine belirli bir oranda safsızlık maddesi karıştırılan yarıiletkene “saf olmayan yarıiletken” adı verilir. Bunlar, iletkenliğin çoğunlukla elektronlar yardımıyla sağlandığı n tipi, iletkenliğin daha ziyade deşiklerle taşındığı p tipi olmak üzere iki tiptir. n-tipi yarıiletkenler, 4 değerli Si veya Ge’ a, belirli yöntemlerle As, Sb, P, N gibi 5 değerli maddelerin katılmasıyla elde edilir.

Si ve Ge yarıiletkenlerine B, Ga, In, Al vb. gibi 3 değerli maddelerin katılması ile p tipi yarıiletken elde edilir. n-tipi bir yarıiletkende elektronlara “çoğunluk taşıyıcıları”, deşiklere “azınlık taşıyıcıları” denir.

3.2. Deneysel Metod

3.2.1. ZnO İnce Filmin Üretilmesi



Şekil 3.1. PFCVAD sisteminin şematik gösterimi.

1. Reaksiyon Odası
2. Filtre
3. Gaz Akış Basınç Kontrol Sistemi
4. Atmalı Plazma Ark Kaynağı
5. Oksijen Tüpü ve Azot Kaynağı
6. Vakum Pompası

İlk olarak üzerine film depolanacak olan cam alt taban temizleme işleminden geçirilir. Cam önce yıkanarak temizlenir; daha sonra yıkama asidinin içerisinde bir süre bekletilir. Bekleme işleminden sonra saf suyla üzerindeki asitten arındırılır. Son olarak da metanol ile doldurulmuş behere daldırılıp çıkarılır. Sonra olarak camlar, kuruma işlemine tabi tutulur. Kuruma işlemi azot tüpü ile basınçlı hava püskürtülerek yapılır.

İkinci olarak içerisi daha önceden metanol ile temizlenmiş olan reaksiyon odacığının içerisinde bulunan katot tutucuya istenilen uzunlukta çinko tel

yerleştirilir. Katot tutucu ise yalıtkan seramiğin içine takılır. Katot filtrenin girişinde bulunan anota doğru yerleştirilir. Temizlenmiş olan cam alt taban da alt taban tutucuya yerleştirildikten sonra alt taban tutucunun filtrenin tam alt kısmına ortalanarak yerleştirilir. Bütün bu işlemler tamamlandıktan sonra reaksiyon odacığının kapağı kapatılır. Reaksiyon odacığının üzerinde bulunan valfin kapalı olduğundan emin olunduktan sonra vakum pompası çalıştırılır. Odacığın içerisindeki basınç 1×10^{-3} Torr seviyesine kadar termocouple gauge den gözlemlenir. Bu değerden daha düşük basınçları iyon gauge den gözlemlenir. Sistem taban basıncına ulaştıktan sonra ortama oksijen veya azot gazı verilerek basınç yükseltilir. Taban basıncı genelde $10^{-5} - 10^{-6}$ Torr civarındadır. Reaksiyon odacığına gaz vererek basıncı 10^{-4} Torr seviyelerine getirip film üretimine geçilmektedir. Gaz verme aşamasında gazın geçiş oranı izlemektedir. Basınç ayarı yapıldıktan sonra iki atma arasındaki süre belirlenerek atmalı plazma ark kaynağının düğmesi açılarak katoda gerilim uygulanmaktadır. Filmler üretilirken, uygulanan ilk gerilimin değeri veya ateşleme voltajı olarak bilinen gerilim (trigger voltajı) 20000 V, ark voltajı 580 veya 500 volt olarak ayarlanır. Bu gerilim katodu aşındırarak ark spotunun oluşmasını sağlar. Bu gerilim ile oluşan ark spotu daha sonra uygulanan 580 veya 500 V luk gerilim ile katodu aşındırarak plazmanın oluşmasına neden olur. Oluşan plazma katot ile anot arasında polarize olur. Böylece katottan anota doğru hareket edebilir. Plazma, filtrenin etrafına sarılı olan tellerden kaynaklanan manyetik alan ile saptırılarak içerisinde bulunan makro parçacıkların filtrenin içerisinde kalması sağlanır. Filtreden geçen plazma filtrenin alt kısmına yerleştirilmiş cam alt taban üzerine düşer. Böylece Zn_3N_2 veya ZnO ince film depolanmış olur.

3.2.2. Karbon Filmlerin Üretilmesi

İlk aşamada üzerine film depolanacak olan cam alt taban önce yıkanarak temizlenir; daha sonra yıkama asidinin içerisinde bir süre bekletilir. Bekleme işleminden sonra saf suyla üzerindeki asitten arındırılarak metanol ile

doldurulmuş, behere daldırılıp çıkarılır. Son olarak, cam alt tabana azot tüpü ile basınçlı hava püskürtülerek kuruma işlemine tabi tutulur.

İkinci aşamada içerisi daha önceden metanol ile temizlenmiş olan reaksiyon odacığının içerisinde bulunan alt taban tutucunun üzerine cam alt taban yerleştirilir. Alt taban tutucu iyon demetlerinin camın üzerine düşecek şekilde plazma kaynağının önüne yerleştirilir. Bütün bu işlemler tamamlandıktan sonra reaksiyon odacığının kapağı kapatılır ve taban basıncı 1×10^{-7} Torr değerine ulaşana kadar vakum pompası çalıştırılır. Sistem taban basıncına ulaştıktan sonra ortama metan gazı verilmeye başlanır. Başlangıçta 5cm civarında gaz akışı verilerek basınç 3×10^{-4} Torr civarında olacak şekilde ayarlanır. İyon enerjisi maksimum moda getirilir ve magnetron gerilimi yavaşça artırılır. Güç 125 Watt olacak şekilde ayarlanıp plazmanın tutuşması için gaz akışı yavaş yavaş artırılır (Plazmanın oluşması sırasında basınç 3.5×10^{-3} Torr'dan daha yukarı bir değerde olmamalıdır).

Plazma elde edilince kaynak sıcaklığının stabilize olması için 2-5 dk beklenir. Daha sonra 1×10^{-4} Torr ve 8×10^{-5} Torr basınçlarında ve 75, 100, 125 Watt güç değerlerinde film üretilmiştir. En yüksek iyon yoğunluğu en düşük çalışma basıncında elde edilir. Plazma çalışırken güç arttıkça iyon akımı da artmalıdır. Daha fazla depolama için alt taban ısıtılmalıdır. Depolama bittiğinde sistem kapatılır. (Kesik,2011)

3.2.3. Yarıiletken İnce Filmlerin Optik Parametreleri

Elde edilen ince filmlerin optik özelliklerini belirlemek için önce oda sıcaklığındaki optik geçirgenlikleri ölçülmektedir. Bu ölçümler 200 – 1100 nm dalga boyu aralığına sahip Perkin-Elmer UV/VIS Lamda 2S Spektrometresi ile yapılmaktadır. Ölçümlerde elde edilen optik geçirgenlik değerlerinin alt taban soğurmasından bağımsız olmasını sağlamak için önce sistemin zemin düzeltmesi yapılarak camdan geçen ışıının %100 olarak normalize edilmektedir. Elde edilen geçirgenlik ve soğurma eğrilerinden, soğurma katsayısı, enerji bant aralığı, yarıiletkenin kalınlığı, bant kuyruğu, kırılma indisi hesaplamaları yapılmaktadır.

3.2.3.1. Kırılma İndisi Hesabı

Kırılma indisi, birçok çalışmada zarf metodu kullanılarak belirlenmiştir. Zarf metodunda, geçirgenlik eğrisi zarf içine alınır. En üst ve en alt zarflara belirli dalga boylarına karşılık gelen $T_{\max}$ ve $T_{\min}$ değerleri belirlenmektedir. Aşağıdaki formül kullanılarak kırılma indisi hesaplanmaktadır

$$n = \left[N + (N^2 - n_s^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Burada

$$N = \frac{(n_s^2 + 1)}{2} + 2n_s \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{T_{\max} T_{\min}} \quad (3.2)$$

ile tanımlanır ve n filmin kırılma indisi, n_s cam alt tabanın kırılma indisi ve değeri 1.53'tür.

3.2.3.1.(1). Elipsometri

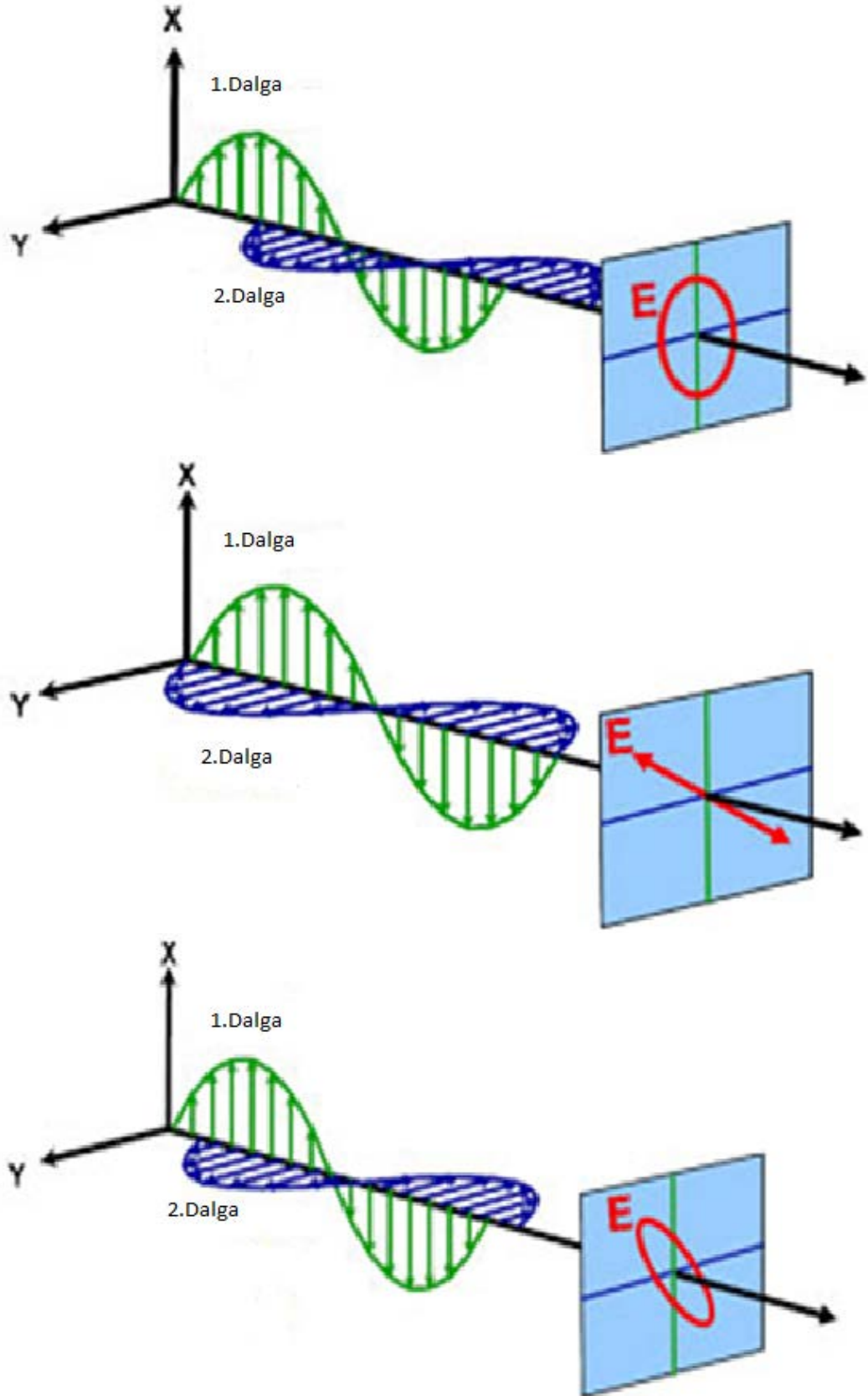
Elipsometri, bir madde yapısından ışığın yansıması ve iletimi sonucunda polarizasyon değişimini ölçer. Polarizasyon değişim oranı, ψ ve faz farkı (Δ) ile temsil edilir. Ölçüm sonuçları optik özelliklere ve materyallerin kendi kalınlığına bağlıdır. Çünkü elipsometri genellikle film kalınlığı ve optik değerleri bulmada kullanılır. Ayrıca oluşumlar, kristallik, pürüzlülük, katkı konsantrasyonu ve optik yansıma ile değişen özellikler ile ilişkilendirilen diğer materyal özelliklerini karakterize eder.

1960'tan beri elipsometri hassasiyeti geliştirilerek nanometre ölçeğindeki tabakaları ölçmek için mikroelektronikte kullanılmaktadır. Bugünlerde uygulama alanları geliştirilerek fizik biliminde temel araştırmalarda, yarıiletken ve veri depolama çözümleri, iletişim, biyosensörler ve optik kaplama endüstrisine kadar

yayılmıştır. Bu yayılma ince filmlerin birçok alanda kullanılmasına ve elipsometrinin farklı türdeki materyallerini ölçebilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Örneğin yalıtkanlar, yarıiletkenler, metaller, süperiletkenler, organikler, biyolojik kaplamalar ve madde alaşımları gibi. Elipsometri ışık ve madde etkileşimine dayanarak ölçüm yapar.

3.2.3.1.(2). Işık ve Polarizasyon

Işık, uzaydaki dalgaların hareketi olarak tanımlanır. Elipsometrinin amacı, dalgaların uzay ve zamandaki davranışlarını ele alır ki bu da polarizasyon olarak bilinir. Bir dalga'nın elektrik alanı daima yayılma yönüne ortogonaldır. Çünkü bir dalga z-yönünde ilerlerken bileşenleri x ve y yönündedir. Işık tamamen rasgele yönelim ve faza sahip olduğunda polarize olmayan ışık olarak addedilir. Elipsometri için spesifik bir yol izleyen ve diğer noktalardan ayrı bir durumla şekillenen elektrik alanın çeşitleriyle ilgileniyoruz. Bu polarize ışık olarak bilinir. İki ortogonal ışık dalgası aynı fazda olduğunda sonuçta oluşan ışık doğrusal olarak polarize olacaktır. Göreceli genlikler sonucun yönelimini sağlar. Ortogonal ışık dalgaları 90° faz açısına sahip ve genlikleri eşit ise sonuç dairesel polarizasyondur. Diğer bir türü eliptik polarizasyon ise dalgaların rasgele genlik ve faz açılarında meydana gelir.



Şekil 3.2. Ortogonal dalga kombinasyonları ve polarizasyon çeşitleri

3.2.3.1.(3). Maddeler

Işığın maddeyle etkileşimini belirleyen 2 önemli değer vardır. Genellikle kompleks sayılarla gösterilir. Kompleks kırılma indisi (n') , (n) indisi ve sönüm sabiti (k)'yı içerir:

$$n' = n + ik \quad (3.3)$$

Alternatif olarak optik özellikler kompleks dielektrik fonksiyon ile temsil edilebilir:

$$\epsilon' = \epsilon_1 + i \epsilon_2 \quad (3.4)$$

Aralarındaki ilişki

$$\epsilon' = n'^2 \quad (3.5)$$

Işığın faz hızı şöyle bulunur:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.6)$$

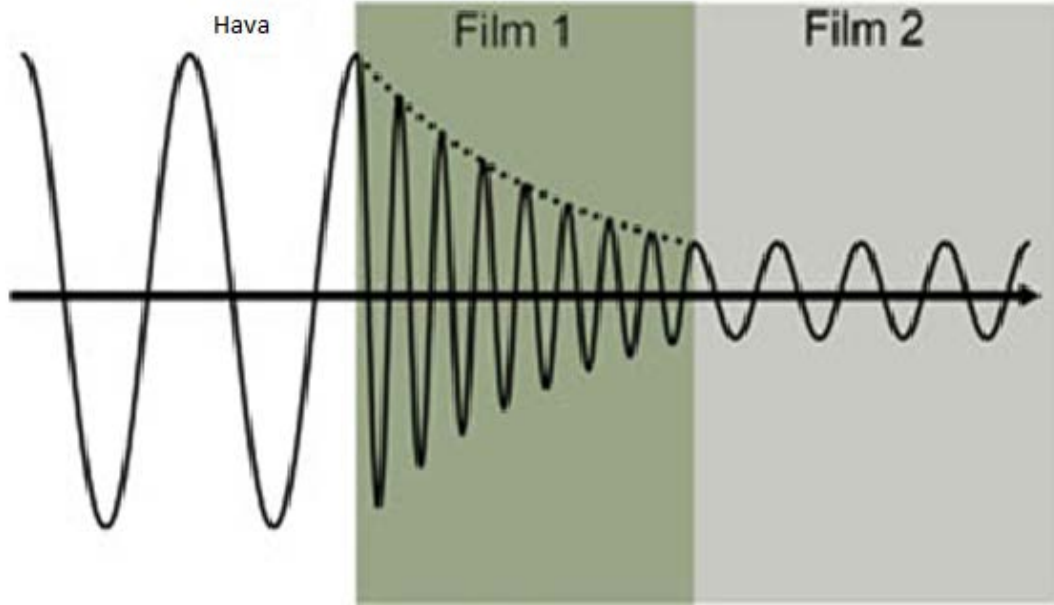
Işık yüksek indisli bir maddeye geldiğinde yavaşlar Çünkü ışık dalgaları aynı kalırken, dalga boyu kısalır. Sönüm katsayısı, dalganın enerjisindeki kayıp olarak tanımlanır ve soğurma katsayısına bağlıdır. Aynı zamanda alpha ile gösterilir:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.7)$$

Işık şiddeti soğurucu bir maddede Beer's yasasına göre kayba uğrar:

$$I(z) = I(0)e^{-\alpha z} \quad (3.8)$$

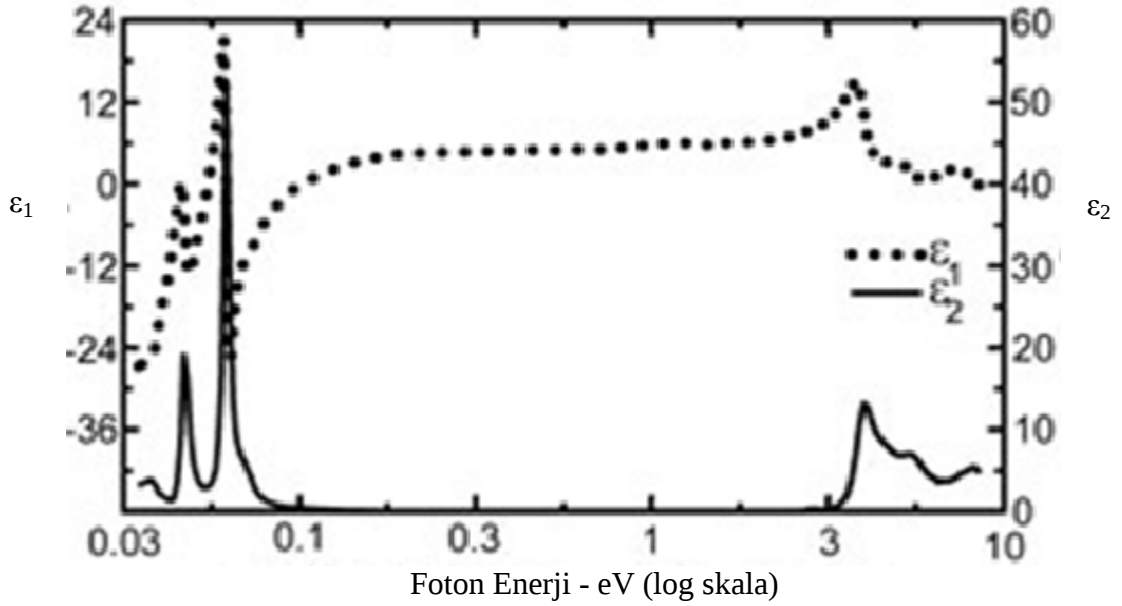
Çünkü sönüm katsayısı, ışığın bir maddenin içinde ne kadar hızlı yok olduğuyla ilgilidir. Aşağıdaki şekilde ışık dalgalarının iki farklı materyaldeki ilerlemesi görülmektedir.



Şekil 3.3. TiO_2 için optik sabitler.

1. Havadan gelen ışık dalgaları önce Film 1’de ve daha sonra da saydam filmde soğurulur.
2. Faz hızı ve dalga boyu maddelerin kırılma indisine bağlı olarak değişir. (Film 1: $n=4$, Film 2: $n=2$)

TiO_2 için optik sabitler ultraviyolede kızıllötesine kadar aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Optik sabitler UV ve IR için farklı yöntemlerle dalga boyu soğurması ile saptanır. IR soğurması moleküler titreşim, fonon titreşimi ve serbest taşıyıcılara neden olur. UV soğurması ise genellikle bir elektronu üst duruma uyararak için enerji sağlayan elektron geçişine neden olur. Aşağıdaki şekil gerçek ve sanal optik sabitlerin birbirinden bağımsız olmadığını göstermektedir. Durumları matematiksel olarak Kramers-Kronig ile tutarlılık gösterir.

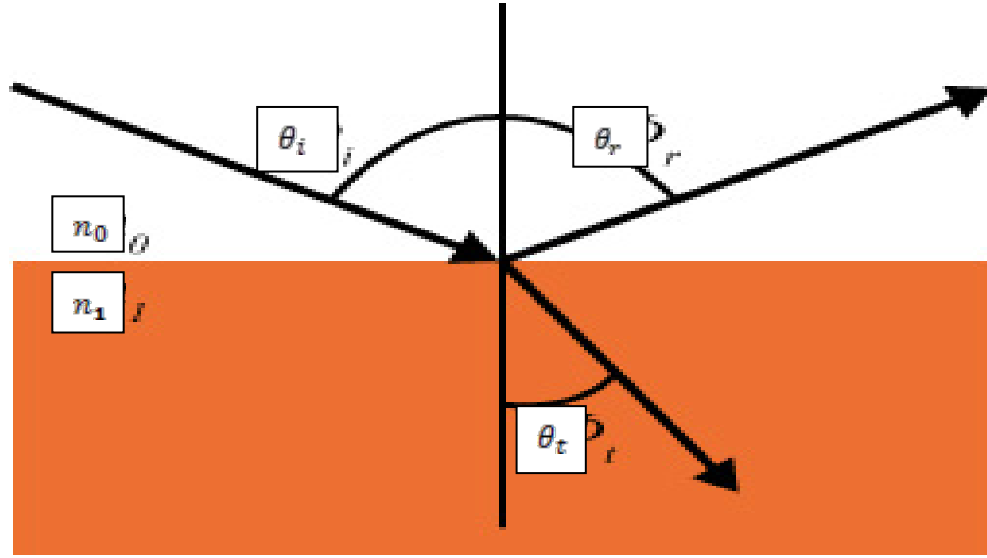


Şekil 3.4. TiO_2 için kızılötesinden(düşük eV) morötesi'ne (yüksek eV) kadar dalga boylarını kapsayan karmaşık dielektrik fonksiyonu.

3.2.3.1.(4). Işık ve Madde Arasındaki Etkileşim

Maxwell denklemleri, ışığın maddeyle etkileşimini açıklamada oldukça tatmin edicidir. Işık şekilde gösterildiği gibi interfazda yansıma ve kırılmaya uğrar. Işın ve normal arasındaki açı ile yansıma açısı arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_t \quad (3.9)$$



Şekil 3.5. Işığın Snell yasasına göre yansımaya ve kırılması.

Bu olaylar sırasında ara yüzden ışığın bir kısmı yansıtılırken geri kalan kısmı kırılma açısı ile iletilir. Bu durum Şekil 3.5 te gösterilmiştir. Sınır şartları, örnek yüzeyin yatay ve dikey elektrik alanları için sağlanır. Çünkü ışık yüzey etki alanı ile ilişkili ortogonal bileşenlerine ayrılabilir. Elektrik alanın yüzey etki alanı ile ilişkili yatay ve dikey bileşenleri p- ve s- polarize olarak addedilir. Bu iki bileşen birbirinden bağımsızdır ve ayrı ayrı hesaplanabilir. Fresnel maddeler arasındaki bir yüzeyde ışığın yansımaya ve iletimini tanımlamıştır:

$$r_s = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_s = \frac{n_i \cos[(\theta)_i] - n_t \cos[(\theta)_t]}{n_i \cos[(\theta)_i] + n_t \cos[(\theta)_t]} \quad (3.10)$$

$$r_p = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)_p = \frac{n_i \cos[(\theta)_i] - n_t \cos[(\theta)_t]}{n_i \cos[(\theta)_i] + n_t \cos[(\theta)_t]} \quad (3.11)$$

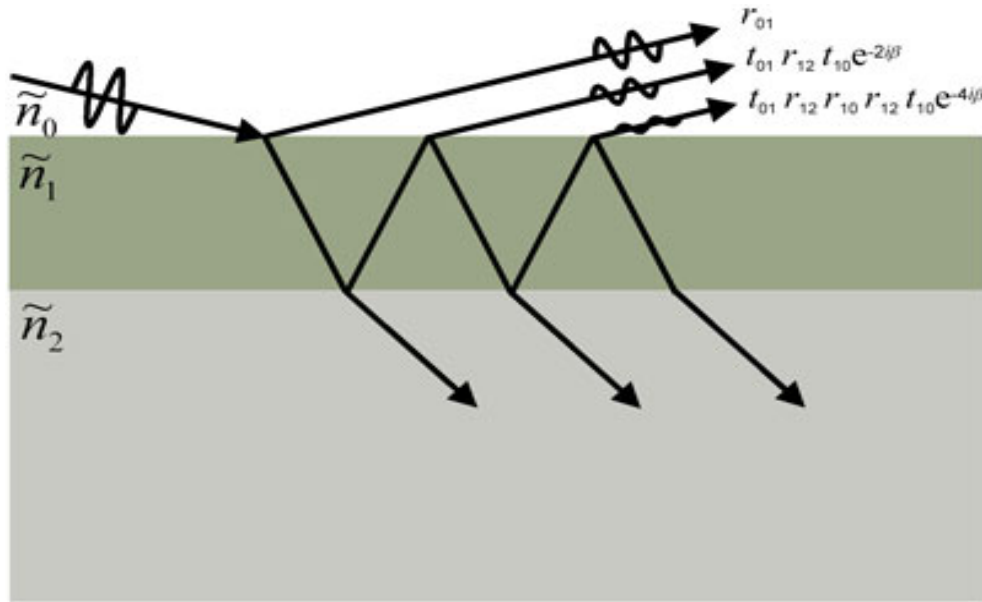
$$t_s = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_t = \frac{2 n_i \cos[(\theta)_i]}{n_i \cos[(\theta)_i] + n_t \cos[(\theta)_t]} \quad (3.12)$$

$$t_p = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)_p = \frac{2 n_i \cos[(\theta)_i]}{n_i \cos[(\theta)_i] + n_t \cos[(\theta)_t]} \quad (3.13)$$

İnce film ve çok tabakalı yapılar Fresnel yansıma ve iletim katsayıları ile uygulanabilir çoklu ara yüzlere neden olur. Işığın yakın fazlardaki bileşenlerini doğru olarak hesaplamak zordur. Bu amaçla film faz kalınlığı tanımlanır:

$$\beta = 2\pi \left(\frac{t_1}{\lambda} \right) n_1 \cos[(\theta)_1] \quad (3.14)$$

Birçok ışık dalgasının süper pozisyonu dalgaların göreceli fazına bağlı girişime neden olur. Şekil 3.6 ışık dalgalarının kombinasyonlarını, yansıyan ışınları ve onların Fresnel hesaplamalarını örneklemektedir.



Şekil 3.6. Bir ince filmde ışınların ara yüzlerden yansıması.

Işınlar arasındaki interfaz elektrik alanın şiddetine ve göreceli faza bağlıdır. Fresnel kırınım ve geçirgenlik katsayıları hesaplamalarda kullanılabilir.

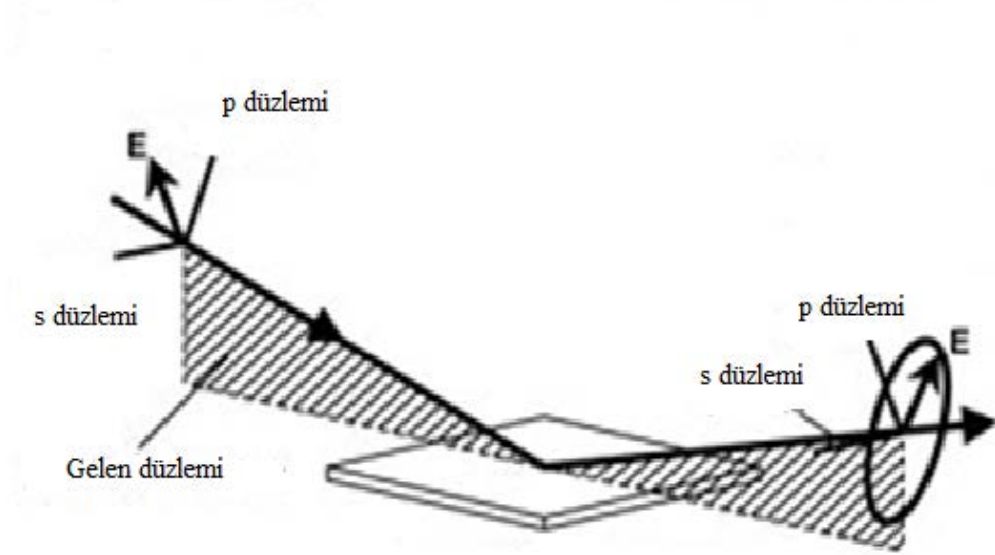
3.2.3.1.(5). Elipsometri Ölçümleri

Elipsometri p-ve s-bileşenlerinin yansıma ve geçirgenliğin birbirlerine göre nasıl değiştiğiyle öncelikle ilgilenmektedir. Bu şekilde, bir referans ışın deneyin bir parçasıdır. Bilinen bir polarizasyonun bir örnekten yansıma ve iletimi

sonrası çıkış polarizasyonu ölçülür. Polarizasyondaki değişim elipsometri ölçümüdür ve şu şekilde ifade edilir:

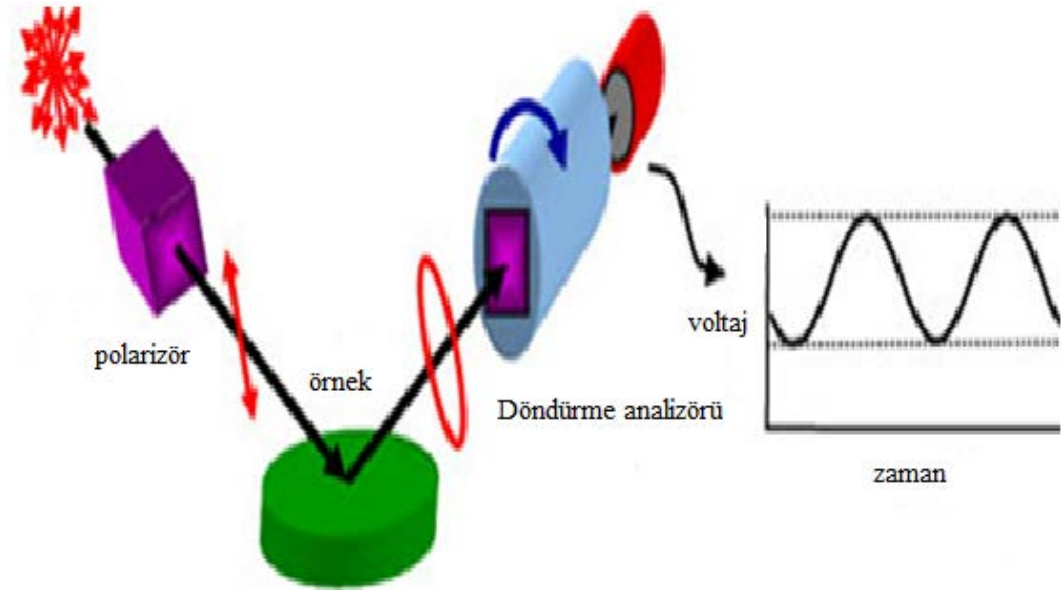
$$\rho = \tan(\psi) e^{i\Delta} \quad (3.15)$$

Bir örnek elipsometri ölçümü şekil 3.7’de gösterilmiştir. Gelen ışığın p- ve s- bileşenleri doğrusaldır. Yansıyan ışık, p-ve s-polarize ışık için genlik ve faz değişimine uğramıştır ki elipsometri bu değişimi ölçer.



Şekil 3.7. Tipik Elipsometri gösterimi. Doğrusal polarize ışık örneğin yüzeyinden yansıması ve polarizasyon değişiminin ölçülmesi

Elipsometriye veri toplamak için başlıca araçlar şunlardır: Işık kaynağı, polarizasyon jeneratörü, örnek polarizasyon analizörü ve dedektör. Kutuplaşma jeneratörü ve analizörü optik kutuplaşmayı değiştiren bileşenlerden yapılmıştır: Polarizatörler denkleştiriciler ve faz modülatörleri. Yaygın elipsometre yapılandırmaları döndürme analizörü (RAE), polarize döndürme (RPE), kompensatörlü döndürme (RCE) ve faz modülasyonu (PME) içerir.



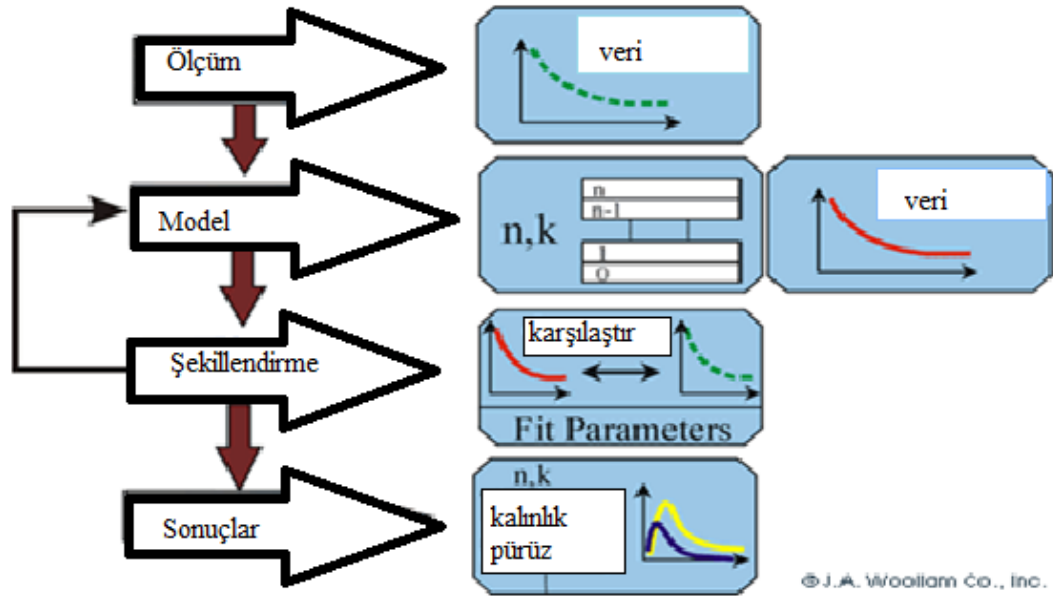
Şekil 3.8. Döndürme analiz elipsometre yapılandırması gelen polarizasyonu tanımlamak için bir polarizör ve örnekten gelen ışığı analiz etmek için bir döndürme polarizörü. Dedektör ışığı yansıyan polarizasyona bağlı bir voltaja dönüştürür.

3.2.3.1.(6). Data Analizi

Elipsometri örneğin film kalınlığı ve optik sabitleri gibi özelliklerini belirlemek için ışığın polarizasyonundaki değişimi ölçer. Bir hacimsel malzeme olması durumunda tek bir yansıma için direkt ters çevrilerek “pseude” optik sabitleri elipsometri ölçümlerinden sağlanarak türetilir.

$$\langle E \rangle = \sin^2(\theta) \left[1 + \tan^2(\theta) \left(\frac{1-p}{1+p} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

Bu denklem yüzey tabakalarının olmadığını varsayar. Ancak bir hacimsel malzemede yüzeyde oksitlenme ve pürüzlülük söz konusudur. Elipsometri ölçümlerinden malzeme özelliklerini anlamak için kullanılan yaygın bir prosedür şekil 3.9’daki akış şemasıyla verilmiştir. Regresyon analizi gereklidir. Genelde cevap yüzlerce deneysel veri noktasından elde edilir. Regresyon analizi, bir çözüm belirlerken ölçülen tüm verilerin çözüme dâhil edilmesini sağlar.

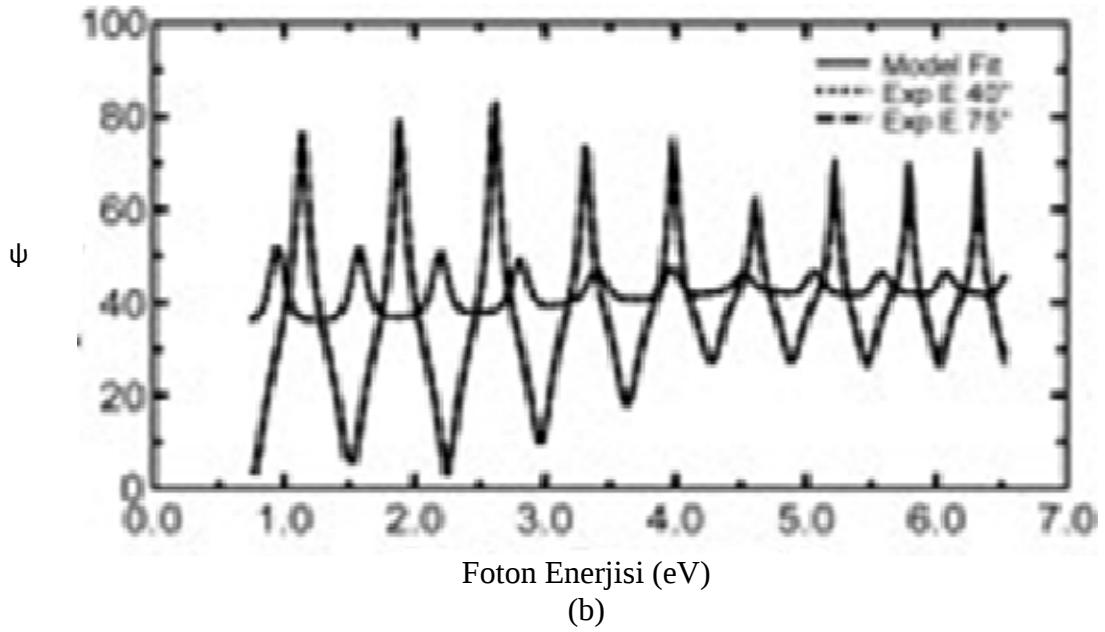
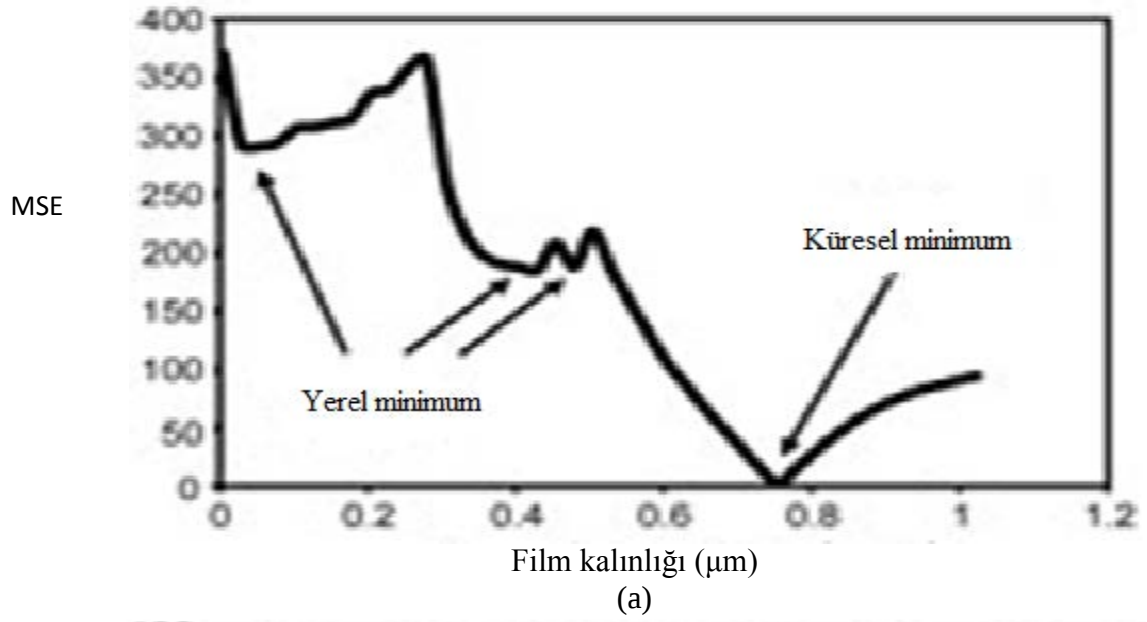


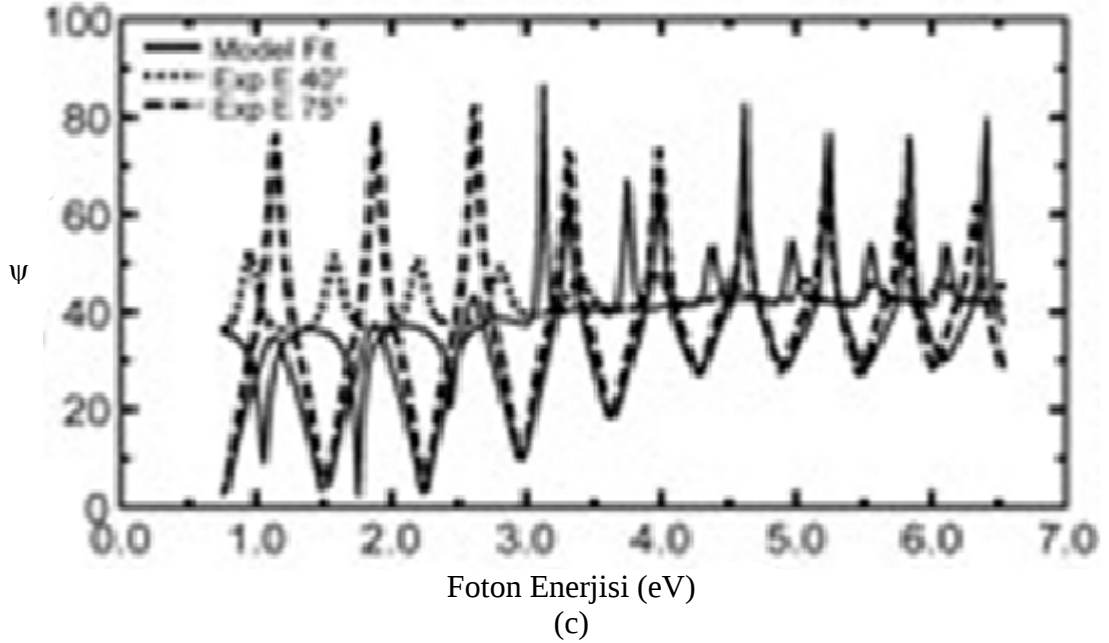
Şekil 3.9. Elipsometri Data analizi için akım şeması.

Veri analizi şu şekilde ilerler: Örnek ölçümü yapıldıktan sonra, örneği tanımlayan bir model oluşturulur. Bu model ile her bir malzemenin kalınlık ve optik sabitlerini tanımlayan Fresnel denklemlerinden sonuç hesaplanır. Bu değerler bilinmiyorsa, bir tahmin ön hesaplama amacıyla verilir. Hesaplanan değerler deneysel veriler ile karşılaştırılır. Herhangi bir bilinmeyen malzeme özellikleri daha sonra deney ve hesaplama arasındaki eşleşmeyi geliştirmek üzere kolayca değiştirilebilir. Bilinmeyen özelliklerin sayısı deneysel verilerin içerdiği bilgi miktarını geçmemelidir. Örneğin, bir tek dalga boyuna sahip elipsometre iki malzeme özelliklerinin maksimum saptanmasına olanak sağlayan iki veri noktası (Ψ , Δ) üretir. Model ve deney arasında en iyi eşleşmeyi bulmak genellikle regresyon yoluyla olur. Bir tahminci, Mean Squared Error (MSE) gibi, eğriler arasındaki farkı ölçmek için kullanılır. Bilinmeyen parametreler minimum MSE değerine ulaşana kadar değişime izin verir.

En iyi cevabı en düşük MSE verir. Örneğin, Şekil 3.10 (a) silikon şeffaf bir film için film kalınlığına karşı MSE eğrisini göstermektedir. Orada birden fazla "yerel" minimum vardır, fakat en düşük değer, MSE kalınlığı 749 nm'de meydana gelmektedir. Bu durum doğru film kalınlığına karşılık gelir. Bu regresyon algoritmasının yanlışlıkla başlangıç kalınlığı ve MSE yapısal koşullarına bağlı

olarak "yerel" minimuma düşmesi mümkündür. Düşük MSE ve yerel minimumluk Şekil 3.10 (b) ve 3.10 (c)'de karşılaştırma yaparak kolayca gerçek minimumu ayırt etmemizi sağlar.

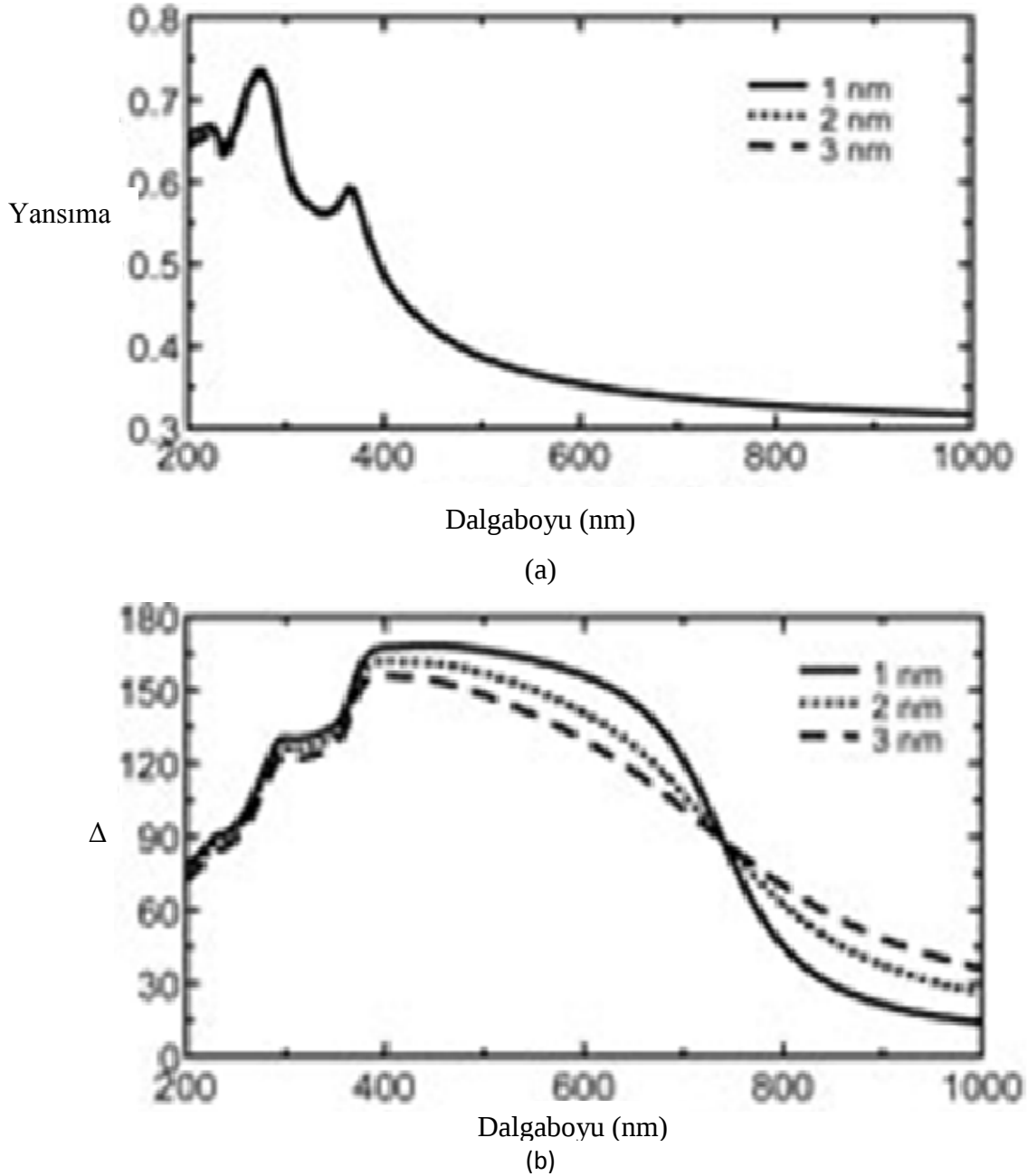




Şekil 3.10. (a) MSE eğrisine karşı kalınlık grafiği 'küresel' minimumu gösterir.(b) Deneysel eğriler ve karşılık gelen eğrileri küresel minimumu oluşturur.(c) Benzer bir eğri yerel minimum yakınlarda 0.45 mikron kalınlığında yanlış bir sonuçtan kolayca ayırt edilebilir.

3.2.3.1.(7). Film Kalınlığı

Film kalınlığı filmin içinden geçen yüzey ve yansıyan ışık arasındaki girişim tarafından belirlenir. Yüzey yansımaya tekrar katılan ışığa bağlı olarak, girişim yapıcı veya yıkıcı olarak tanımlanabilir. Girişim genlik ve faz bilgileri içerir. Faz bilgisi Δ 'dan alt tek tabaka kalınlığına kadar filmler çok hassastır. Şekil 3.11'de yansıma şiddeti ve elipsometri Si üzerinde kaplı ince SiO_2 tabaka serileri için karşılaştırılmıştır. Her bir film için yansıma hemen hemen aynı iken Δ 'da büyük farklılıklar vardır. Buradaki Δ elipsometride olmalıdır. Bu yöntem ise elipsometriden kalınlık hesabıdır.



Şekil 3.11. (a) Yansımaya şiddeti (b) Silisyum üzerindeki 3 ince oksit için nanometre skalasındaki filmlerde deltanın yüksek hassasiyette yoğunluk ölçümü gözlenemez.

Elipsometri genellikle kalınlığı nanometre altından birkaç mikrona kadar olan aralıklardaki filmlerde kullanılır. Filmlerin kalınlığı birkaç on mikrona çıktığında uzun kızılötesi dalga boyları hariç girişim titreşimleri giderek daha zor çözülür. Bu durumda diğer karakterizasyon teknikleri tercih edilmektedir. Kalınlık

ölçümleri aynı zamanda bir bütün film boyunca hareket eden ve yüzeye geri dönen ışınları gerektirir. Malzeme ışık soğurursa, optik araçlarla kalınlık ölçümleri, ince yarı-opak tabakalarla sınırlı olacaktır. Bu sınırlama düşük soğurmaya sahip bölgelerde ölçüm yapılarak atlatılabilir. Örneğin, bir organik film güçlü bir UV ve IR ışığı soğurabilir, ancak orta görünür dalga boylarında şeffaf kalır. Şiddetli soğuran dalga boylarındaki tüm metaller için, maksimum tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 100 nm'dir.

3.2.3.1.(8). Optik Sabitler

Kalınlık ölçümleri optik sabitlerden bağımsız değildir. Film kalınlığı film aracılığıyla iletilen ışığın yol uzunluğunu etkiler, ancak indisi ışık dalgalarının hızı ve kırılma açısını belirler. Böylece hem film içinde iletilen ışığın, hem de yüzeyden yansıyan ışığın filme katkısı olur. n ve k , doğru optik sabitler elde edebilmek için kalınlık boyunca bilinmeli veya hesaplanmalıdır.

Bir malzeme için optik sabitler farklı dalga boyu için değişir ve tüm dalga boylarında denenerek elipsometriye tanımlanmalıdır. Bir optik sabitler tablosu, her dalga boyunda malzemenin sonucunu tahmin etmek için de kullanılabilir. Ancak, bilinmeyen optik sabitleri bir dalga boyundan başka dalga boyuna göre ayarlamak çok uygun değildir. Aynı anda tüm dalga boylarını kullanmak daha avantajlıdır. Bir dağılım bağıntısı genellikle dalga boyuna karşı optik sabitleri tanımlayarak bu sorunu çözer. Her dalga boyundaki n ve k değerleri karşılaştırıldığında bu işlem büyük ölçüde bilinmeyen "serbest" parametre sayısını azaltır.

Şeffaf malzemeler için, indis genellikle Cauchy veya Sellmeier ilişkisi kullanılarak açıklanmıştır. Cauchy bağıntısı tipik olarak şu şekilde verilir:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (3.17)$$

Bu üç terim kırılma indisine uygun şekilde malzeme için ayarlanır. Cauchy, K-K ile tutarlı değildir ve fiziksel olmayan dağılım üretebilir. Sellmeier bağıntısı ise optik dağılımın gerçekçi bir biçimde kalmasını sağlar. Sellmeier bağıntısı şu şekilde yazılabilir:

$$\epsilon_1 = \frac{A \lambda^2 \lambda_0^2}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)} \quad (3.18)$$

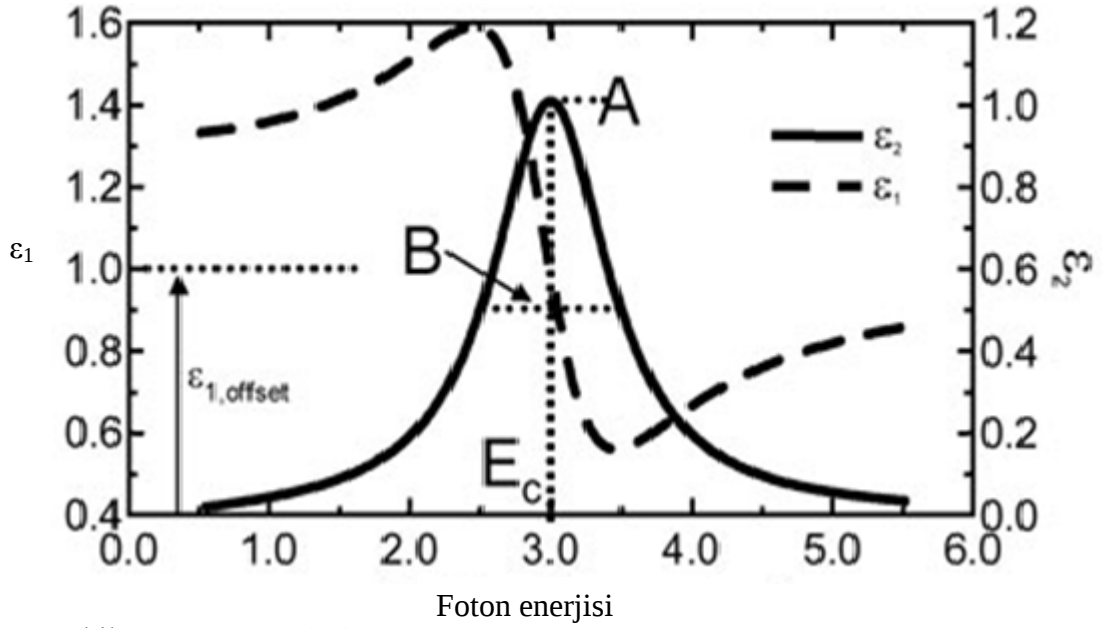
Soğurucu malzemeler Cauchy veya Sellmeier ile modellendiğinde genellikle şeffaf bir dalgaboyu bölgesine sahip olacaktır. Ancak, soğurucu bölgede hem gerçek hem de sanal optik sabitleri hesaba katmak gerekir. Birçok dağılım bağıntısı çeşitli malzemeler için soğurmayı tanımlamak için osilatör teorisini kullanır. Lorentz, Harmonik ve Gauss böyledir. Hepsisi Genlik, Genişleme ve Merkezi Enerji (ışık frekansı ile ilgili) ile tanımlanan soğurma özelliklerini içerir. Kramers-Kronig osilatör tarafından tanımlanan hayali hareketlerden sonra gerçek bileşenler hesaplanabilir. Bir telafi de gerçek bileşene ölçüm bölgesi dışındaki ekstra soğurma eklenerek yapılır. Lorentz osilatör şöyle yazılabilir:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_{1,offset} + \frac{AE_c}{E_c^2 - E^2 - iBE} \quad (3.19)$$

Parametreler Genlik için (A), Genişlemesi (B), Merkezi Enerji (Ec) ve (seti Kapalı E1) burada tipik bir Lorentz osilatör için Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Enerji, E, bir dalga'nın frekansı ile ilgili olup, n:

$$E = h\nu \cong \frac{1240}{\lambda_{nm}} \quad (3.20)$$

h Planck sabiti ve dalga boyu I, nanometre verilmiştir. Tauc-Lorentz ve Cody-Lorentz gibi daha gelişmiş dağılım modelleri band aralıklı enerjiyi tanımlayan terimleri de içerecektir.



Şekil 3.12. Optik Sabitler.

Elipsometri ince filmler ve dökme malzemeleri ölçmek için kullanılan optik bir tekniktir. Malzemenin özelliklerini anlamak için malzeme yapısındaki yansıma veya geçirgenlikten kaynaklanan kutuplanmadaki değişimlerden faydalanılır. Bu teknik ince film karakterizasyonuna talebin artmasına bağlı olarak gelişmeye devam etmektedir (jawoollam).

3.2.3.2. Soğurma Katsayısı

Tek renkli ışık demetinin soğurucu özelliğe sahip örnek üzerine

$$-\Delta I = I_T - I_0 = I_0 \alpha \Delta x \quad (3.21)$$

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^2 \quad (3.22)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada A soğurma, E_g yasak enerji aralığıdır (Pankove, 1975).

3.2.3.3. Yasak Enerji Aralığı

Elektronlar en düşük enerji seviyelerinden başlayarak üst enerji seviyelerini doldurur. Katılardaki atomların dalga özelliklerinden dolayı bazı enerji seviyeleri yasaklıdır. Enerjinin yasaklı olduğu aralığa yasak enerji aralığı denir. Kısacası valans bandı ile iletim bandı arasındaki boşluktur.

Valans bandı $T=0^\circ \text{ K}$ 'de en dolu seviyeye denir. İletim bandı ise $T=0^\circ \text{ K}$ 'de valans bandının üstündeki ilk boş seviyeye iletim bandı denir. Fermi seviyesi ise $T=0^\circ \text{ K}$ 'de elektronların doldurabileceği en son seviyedir. Bu seviyenin enerjisine Fermi enerjisi denir. Buna da kimyasal potansiyel denir. Hakiki yarıiletkenlerde Fermi enerjisi yasak enerji aralığının yarısına eşittir. Metallerde Fermi enerjisi yoktur. Valans bandı ve iletim bandı çakışmıştır. Yalıtkanlarda ise Fermi enerjisi iletim bandına çok yakındır.

Yasak enerji aralığına gelince, soğurma katsayısının enerjiyle çarpımının karesinin enerjiye karşı çizilen $(\alpha E)^2$ -E grafiğinin teğetinin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji aralığını vermektedir.

3.2.3.4. Optiksel Geçirgenlik

Elde edilen filmlerin optik geçirgenlik eğrileri, oda sıcaklığında bir çift demet bilgisayar kontrollü (Perkin Elmer UV/VIS Lamda 2S) spektrometre ile elde edilmiştir. Spektrometrenin dalga boyu Aralığı $\lambda = 190\text{-}1100 \text{ nm}$ 'dir. Sistemin önce zemin düzeltilmesi yapılarak camdan geçen ışınım % 100 olarak normalize edilmiştir. Böylece, örnek üzerinden okunacak oda sıcaklığındaki optik geçirgenlik değerleri alt taban (cam) soğurmasından bağımsız olacaktır.

3.3. Teorik Metod

Yarıiletken ince film verileri MatLAB'deki spline komutu ile interpolasyon yapılarak eşit aralıktaki dalga boylarına karşılık gelecek şekilde elde edilmiştir. Spline komutunun kullanımı şu şekildedir

3.3.1. Spline Komutu

Amerika Birleşik Devletlerinde 1900 ile 1990 arasında 10 yılda bir tekrarlanan nüfus sayımının sonuçları t ve p vektörleriyle verilmiştir.

```
t = 1900:10:1990;
```

```
p = [75.995 91.972 105.711 123.203 131.669...
```

```
150.697 179.323 203.212 226.505 249.633];
```

1975 yılında ABD nüfusunu hesaplayınız.

```
interp1(t,p,1975)
```

```
ans = 214.8585
```

Çoğunlukla yukarıdaki tipteki bilgiler tek tabloda özetlenir. Aynı işlemi aşağıda tekrar edelim.

```
tab = 1950 150.697
```

```
1960 179.323
```

```
1970 203.212
```

```
1980 226.505
```

```
1990 249.633
```

```
p = interp1(tab(:,1),tab(:,2),1975)
```

```
p = 214.8585
```

Ara değer hesabında kullanılan yöntemler:

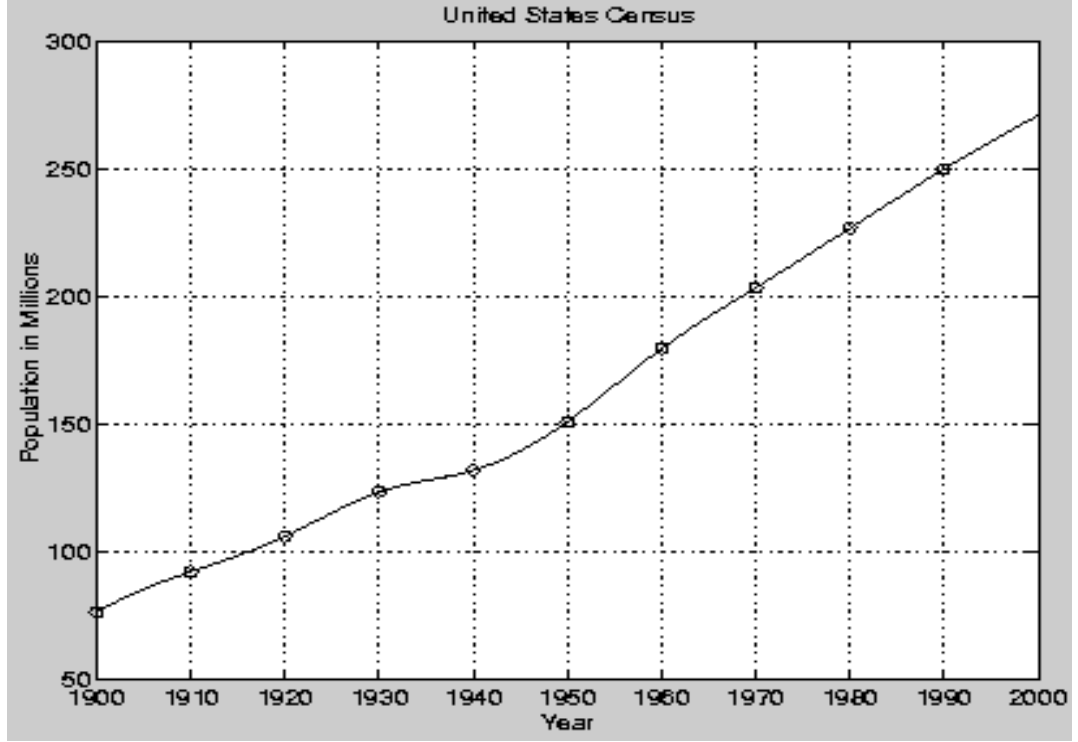
- ☐ linear: Doğrusal ara değer bulmakta kullanılır.
- ☐ nearest: Yakın olan değeri seçer.
- ☐ spline: Ara değer cubic spline yöntemi ile hesaplanır.
- ☐ cubic: Ara değer cubic Hermite yöntemi ile hesaplanır.

Şimdi 1900-1990 arası nüfus artışının grafiğini çizdirelim.

```
x = 1900:1:2000;
```

```
y = interp1(t,p,x,'spline');
```

plot(t,p,'o',x,y)



Şekil 3.13. 1900-1990 arası nüfus artışının grafiği

Ara değer bulmada kullanılan yöntemler ekstrapolasyon işleminde de kullanılabilir.

3.3.2. Ankor (Referans noktası, bağlantı) Pencere Metodu

Kramers-Kronig analizinde, belli bir spektrumda alınan verilerin tüm spektruma genellenmesi gerekir. Hangi tür cihaz kullanılırsa kullanılsın bu böyledir. Bu amaçla da ölçüm aldığımız spektrumun dışındaki bölgelerde limit olduğu varsayılır ve azalan kabul edilir. Burada kullandığımız teknik ankor-pencere metodudur.

Bir yansıtma spektrumunun Kramers-Kronig algoritmasının temelini ankor-pencere tekniği oluşturur. Kramers-Kronig analizinin gerektirdiği yüksek frekanslı asimptot, bir sistemin bilinen optik sabitlerinin küçük bir ankor

penceresinde ölçülmesi ve araştırılması sonucunda ortaya çıkanlar ile Kramers-Kronig ile elde edilenlerin arasındaki farklılıkların azaltılması ile hesaplanır.

Kızılötesi yansıtma spektrumu, kızılötesi spektrum aralığındaki optik araştırmalarda önemli bir araçtır. Bir araştırmada optik parametreler, dielektrik fonksiyon $\varepsilon(\omega)$ ve optiksel iletkenlik $\sigma(\omega)$ Kramers-Kronig kullanılarak yansıtma spektrumu olan $R(\omega)$ 'dan hesaplanabilir. İkisi arasındaki bağlantı da şu şekildedir:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{i4\pi\sigma(\omega)}{\omega} \quad (3.23)$$

Kramers-Kronig analizi, genellikle analizin hassasiyetini azaltan ekstrapolasyon (dış değer) deneysel verilerinden düşük ve yüksek frekans limitlerinde değerler içerir. Yansıtma spektrumunun yüksek frekans asimptotu K-K ile bulunan optiksel iletkenlik $\sigma(\omega)$ ile muhtemel küçük bir ankor penceresinden ölçülen optiksel iletkenlik $\sigma(\omega)$ değerlerinin farklılıklarının minimize edilmesiyle hesaplanır.

Metalik bileşenlerde, Kramers-Kronig'in içerdiği düşük ve yüksek frekanslı yansıtma asimptotları yaklaşık olarak şu bağıntılarla hesaplanır:

$$R_{lf}(\omega) = 1 - c\sqrt{\omega} \quad (3.24)$$

$$R_{hf}(\omega) = \frac{c}{\omega^4} \quad (3.25)$$

Buradaki düşük frekans asimptotu $R_{lf}(\omega)$, Hagen-Rubens yasasına uyar ve yüksek frekanslı asimptot $R_{hf}(\omega)$ ise genel frekansa bağlı karakteristik enerjisini aşan bir foton enerjisine benzer. Yukarıdaki ekstrapolasyon $R(\omega)$ ve K-K bağıntıları kullanılarak faz faktörü $\theta(\omega)$ hesaplanabilir:

$$\theta(\omega) = -\frac{\omega}{\pi} P \int_0^\infty \frac{d\omega' (\ln R(\omega'))}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (3.26)$$

Kompleks yansıma büyüklüğü:

$$r(\omega) = |r(\omega)| \exp(i\theta(\omega)) \quad (3.27)$$

Daha sonra şu bağlantı kullanılarak dielektrik fonksiyon ve optik iletkenlik bulunabilir:

$$r(\omega) = \frac{\left[\frac{1}{\epsilon^2(\omega)} - 1 \right]}{\left[\frac{1}{\epsilon^2(\omega)} + 1 \right]} \quad (3.28)$$

K-K analizinde hassasiyeti artırmak için farklı teknikler de bulunmaktadır. Örneğin ankor-nokta metodunun modifikasyonu olan bir ankor-pencere tekniği kullanılabilir. Yüksek frekans asimptotu polinomların tersi ile modellenebilir:

$$R_{hf}(\omega) = [b_0 + b_1\omega + b_2\omega^2 + b_3\omega^3 + b_4\omega^4]^{-1} \quad (3.29)$$

b_i katsayısı, K-K ile hesaplanan optik iletkenlik ve deneysel değerlerin sınırlı bir spektrum bölgesinde yani ankor penceresindeki değerleri arasındaki farklılıkların minimize edilmesiyle hesaplanır. Hata fonksiyonu şu şekilde verilir:

$$x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\sigma_{KK}[n] - \sigma_{deneysel}[n]}{\sigma_{deneysel}[n]} \right|^2 \quad (3.30)$$

$\sigma_{deneysel}[n]$ ise n spektrum noktasındaki ankor penceresine ait olan deneysel optik iletkenliktir. $\sigma_{K-K}[n]$ ise K-K'den elde edilen değerler ve N ise ankor

penceresindeki noktaların sayısıdır. Yansıtma spektrumunun düşük frekanslı asimptotu yaklaşık olarak şu şekilde bulunur:

$$R_{lf}(\omega) = 1 - a_1 \sqrt{\omega} - a_2 \omega \quad (3.31)$$

a_1 ve a_2 katsayıları ise en küçük kareler metoduyla bulunur. Hata fonksiyonunun minimizasyonu:

$$x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |R_{lf}[n] - R_{deneysel}[n]|^2 \quad (3.32)$$

$N=5-10$ sayıları ilk birkaç spektrum noktasının deneysel yansıtma spektrumunun sayısıdır (Tumenas ve ark.,2011).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kramers-Kronig Dönüşümleri

Elektromanyetik dalgaın optik ve x-ışını bölgelerinde dispersiyon ve soğurma arasındaki ilişkiyi ilk defa birbirinden bağımsız olarak Kronig ve Kramers 1927’de çıkartmışlardır (Landau ve Lifshitz, 1960).

Bir dalgaın dağılımı, faz hızının frekansın fonksiyonu olarak değişimine denir. Hacimsel ortamda veya boş uzayda yayılan bir dalga için dispersiyona neden olan şey sadece ve sadece zayıflamadır. Zayıflama dispersiyon için yeterli ve gerekli bir koşuldur. Dispersiyonu ve zayıflamayı birbirine bağlayan ilişki Kramers-Kronig bağıntısıdır. Bu bağıntının geçerliliği,

1) Sistemin süperpozisyon prensibinin uygulanabilirliğini sağlayan lineerliğe sahip olması,

2) Sistemin nedensellik prensibini sağlaması gerekmektedir (Landau ve ark.,1960).

4.1.1. Matematiksel Temeller

Fourier Dönüşümü

$$F(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad (4.1)$$

Sign fonksiyonu ve Dirac delta

$$sgn(t) = +1 \quad t > 0 \quad sgn(t) = -1 \quad t < 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt} sgn(t) = 2\delta(t) \quad (4.3)$$

Sign fonksiyonunun Fourier Dönüşümü

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{sgn}(t) e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d}{dt} \text{sgn}(t) \frac{1}{-i\omega} e^{-i\omega t} dt = i \frac{2}{\omega} \quad (4.4)$$

Konvolüsyon 1

$$f(t) = g(t)h(t) \quad (4.5)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [G(\omega - \omega') H(\omega')] d\omega' \quad (4.6)$$

Konvolüsyon 2

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t - t') h(t') dt' \quad (4.7)$$

$$F(\omega) = G(\omega)H(\omega) \quad (4.8)$$

4.1.2. Tepki Fonksiyonu

Tepki fonksiyonu:

$$P(r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int d^3r' \chi(r, r', t, t') E(r', t') \quad (4.9)$$

Dönüştürülebilir değişmezlik:

$$\chi(r, r', t, t') = \chi(r - r', t - t') \quad (4.10)$$

Fourier:

$$P(q, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \int \frac{d^3 q'}{(2\pi)^3} \chi(q - q', t - t') E(q', t') \quad . \quad (4.11)$$

Dalgaboyu sınırı:

$$P(q, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt' \chi(t - t') E(t') \quad (4.12)$$

$$P(w) = \chi(w) E(w) \quad (4.13)$$

Bu denklemlere 4.7 ve 4.8 uygulanırsa:

$$\tau = t - t' \quad (4.14)$$

olmak üzere hakkında şu söylenebilir:

1. Reel fonksiyondur.
2. t:akım zamanı ve t' t'den önceki bir fiziksel etki olmak üzere

$$\tau < 0 \quad \text{için} \quad \chi(\tau) = 0 \quad (4.15)$$

Duyarlılık

τ 'yu t kullanarak sadeleşme yoluna gidilebilir:

1- $\chi(t)$ reel bir fonksiyondur. $\text{Im}=0$

Fourier dönüşümünden:

$$\chi(-w) = \chi^*(w) \quad (4.16)$$

$$\chi_1(-w) = \chi_1(w) \text{ çift} \quad (4.17)$$

$$\chi_2(-w) = \chi_2(w)_{\text{tek}} \quad (4.18)$$

$$\chi(w) = \chi_1(w) + i\chi_2(w) \quad (4.19)$$

2. Nedensellik

$$t < 0 \text{ için } \chi(t) = 0 \quad (4.20)$$

Tek ve çift fonksiyonlar birbirinden ayrılır

$$\chi(t) = p(t) + q(t) \quad (4.21)$$

Çift olan reel kısım ve tek olan sanal kısmın fourier dönüşümü

$$p(t) \rightarrow \chi_1(w') \quad (4.22)$$

$$q(t) \rightarrow i\chi_2(w')$$

olmak üzere

$$\chi(w') = \int_{-\infty}^{+\infty} [p(t) + q(t)] e^{-iw't} dt \quad (4.23)$$

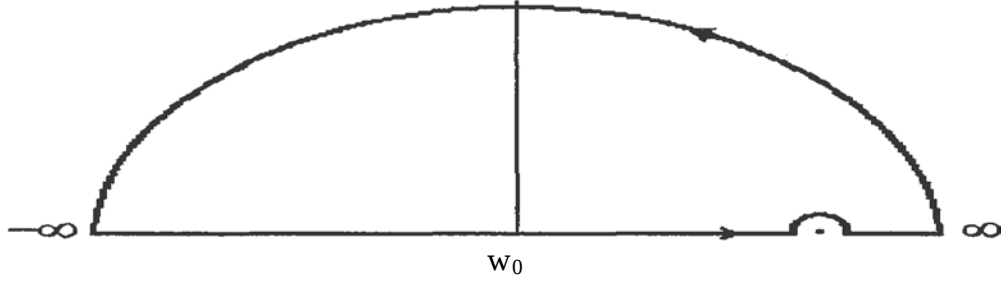
4.1.3. Rezidü Teoremi ve Hilbert Dönüşümü

w' kompleks değişken ve $\chi(w')$ analitik fonksiyonu olmak üzere reel ve sanal kısımlara ayrıldığında,

$$\chi(w') = \chi_R(w') + i\chi_I(w') \quad (4.24)$$

$\chi(w')$ 'nü reel w' 'yı içeren $w' - w$ ile bölme ve Cauchy rezidü teoremini uygulanır.

Kapalı yarım daire düşünelim ve C konturu üzerinden integral alalım. Sonsuz yarıçaplı yarım daire boyunca da integrale gelecek olan katkı sıfırdır.



Şekil 4.1. Yarım daire boyunca integral.

Rezidü teoremi şu sonucu verir:

$$\int_C \frac{\chi(w')}{w' - w} dw' = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi(w')}{w' - w} - i\pi\chi(w) = 0 \quad (4.25)$$

Reel ve sanal kısımları ayırılırsa,

$$\chi_R(w) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} dw' \frac{\chi_I(w')}{w' - w} \quad (4.26)$$

$$\chi_I(w) = -\frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} dw' \frac{\chi_R(w')}{w' - w} \quad (4.27)$$

Kramers-Kronig bağıntısı elde edilir. Reel kısmı sanal kısmın Hilbert dönüşümüdür. Matematiksel olarak da $w=w'$ noktasındaki diverjansla doğrulanır(Mihaly,2006).

4.1.4. Cauchy Değeri

$F(x)$ fonksiyonu, a noktasında tekilliğe sahipse ve çok küçük bir ε seçilerek limit alınırsa:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{a-\varepsilon} f(x)dx + \int_{a+\varepsilon}^{\infty} f(x)dx \right] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx \quad (4.28)$$

Cauchy prensibi değeri (Cauchy principal value) elde edilir.

Fiziksel olmayan negatif frekansları çıkarılır ve integraller tek ve çift fonksiyon olma durumuna göre sonuçlandırılırsa,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{tek fonksiyon } dw' = 0 \quad (4.29)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{çift fonksiyon } dw' = 2 \int_0^{\infty} \text{çift fonksiyon } dw' \quad (4.30)$$

$$\chi(w') = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dw''(x_2(w''))}{w'' - w} \frac{w' + w}{w'' + w} \quad (4.31)$$

aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$\chi_R(w) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{dw''(w' \chi_1(w''))}{w'^2 - w^2} \quad (4.32)$$

$$\chi_1(w) = -\frac{2w}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dw''(\chi_R(w''))}{w'^2 - w^2} \quad (4.33)$$

$w'=w$ da diverjansın hesaplanması ile

$$\frac{-2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{dw' (w' \chi_2(w'))}{w'^2 - w^2} = 0 \quad (4.34)$$

Sonuç olarak :

$$\chi_1(w) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{dw' (w' [\chi]_2(w') - \chi_2(w))}{(w' + w)(w' - w)} \quad (4.35)$$

$$\chi_2(w) = -\frac{2w}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{dw' (\chi_1(w') - \chi_1(w))}{(w' + w)(w' - w)} \quad (4.36)$$

bulunur.

4.1.5. Kramers - Kronig Dönüşümleri(σ, ε)

Tepki fonksiyonu olmadığı durumda:

$$\sigma_1(w) = \frac{2}{\pi} p \int_0^{+\infty} \frac{dw' (w' \sigma_2(w'))}{w'^2 - w^2} \quad (4.37)$$

$$\sigma_2(w) = -\frac{2w}{\pi} p \int_0^{+\infty} \frac{dw' (\sigma_1(w'))}{w'^2 - w^2} \quad (4.38)$$

Soğurma olmadığı durumda:

$\varepsilon=1$

$$\varepsilon_1(w) - 1 = \frac{2}{\pi} p \int_0^{+\infty} \frac{dw' (w' \varepsilon_2(w'))}{w'^2 - w^2} \quad (4.39)$$

$$\varepsilon_2(w) = -\frac{2w}{\pi} p \int_0^{+\infty} \frac{dw' [\varepsilon_1(w') - 1]}{w'^2 - w^2} \quad (4.40)$$

Hesaplama da kullanılan formüller:

$$\theta(\omega) = -\frac{\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} d\omega' \frac{\ln R(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (4.41)$$

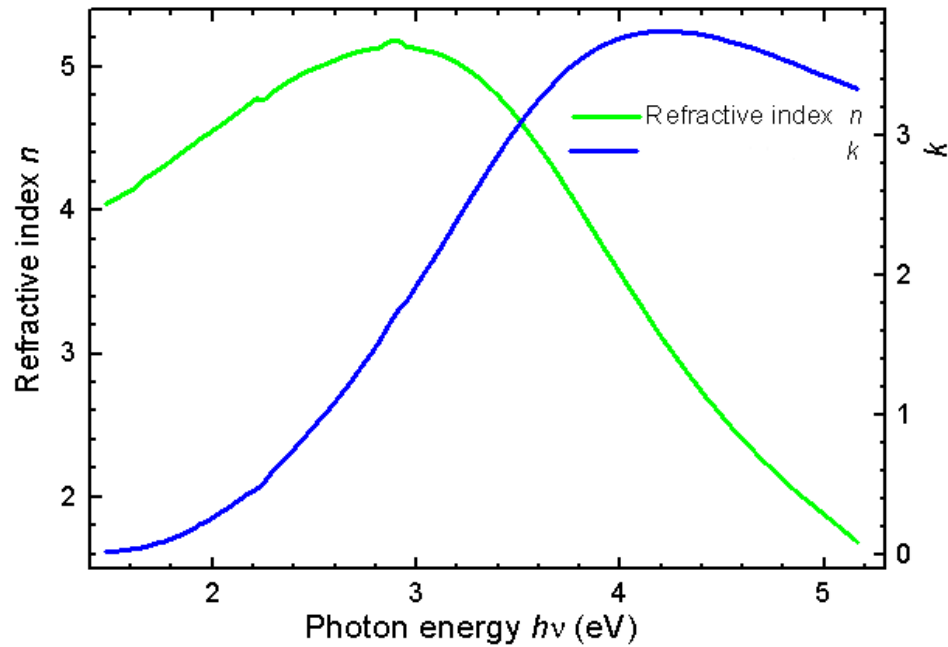
$$n(\omega) = \frac{1 - R(\omega)}{1 + R(\omega) - 2\sqrt{R(\omega)\cos(\theta(\omega))}} \quad (4.42)$$

$$k(\omega) = \frac{-2\sqrt{R(\omega)\sin(\theta(\omega))}}{1 + R(\omega) - 2\sqrt{R(\omega)\cos(\theta(\omega))}} \quad (4.43)$$

4.2. Program Çıktısı

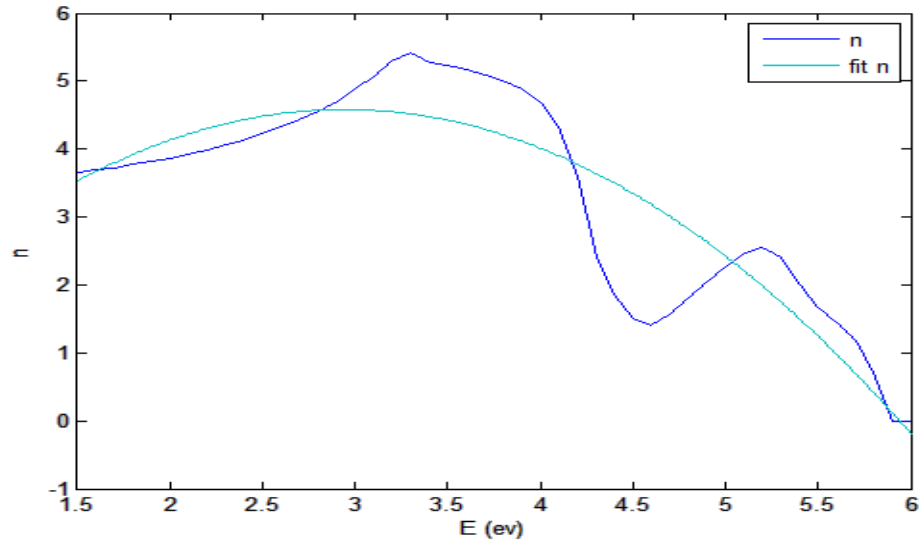
Si için bulunan sonuçlar şu şekildedir:

Veriler(Aspnes ve ark.,1982)

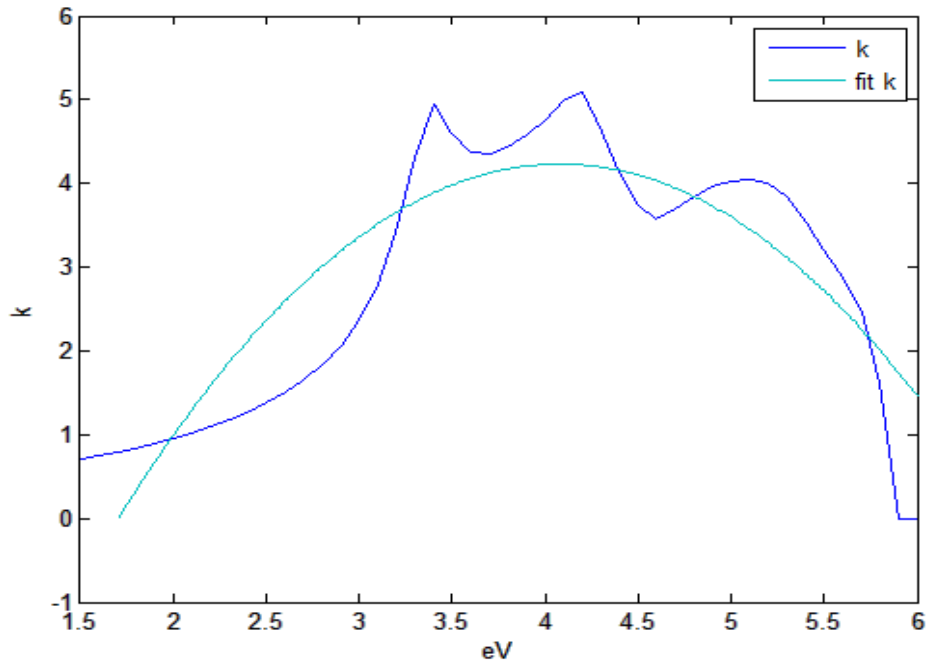


Şekil 4.2. Referans amaçlı Si için $h\nu$ (enerji-eV) - n (kırılma indisi) ve $h\nu$ (enerji-eV) - k (sönüm katsayısı) grafiği

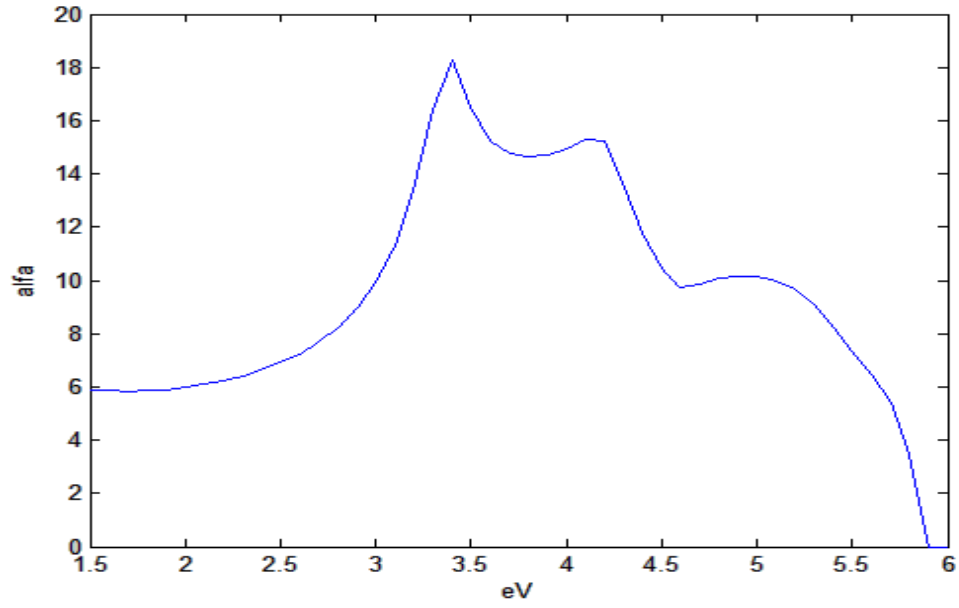
Matlab programı ile Si için elde edilen Kramers-Kronig verileri:



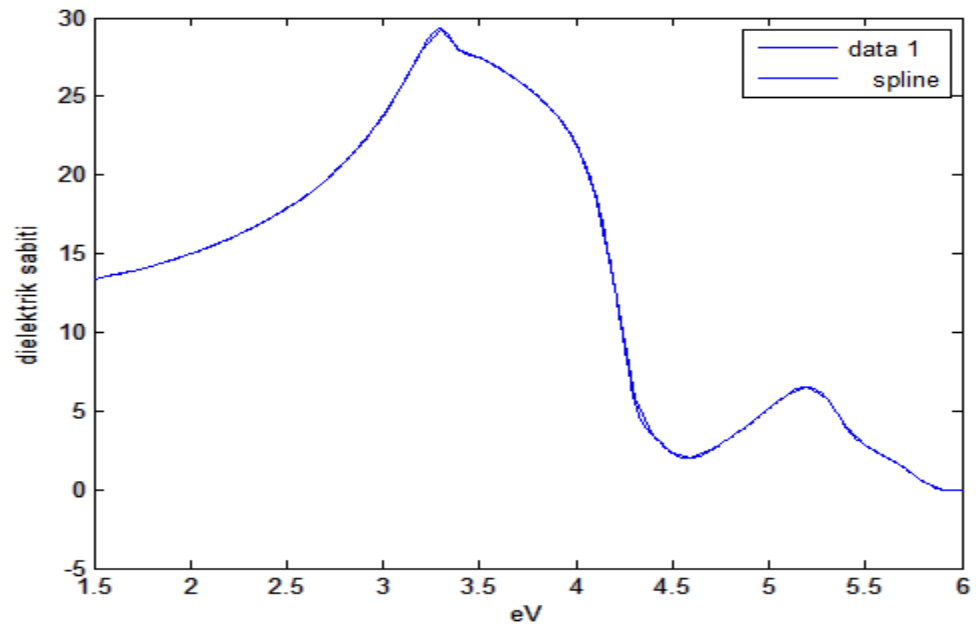
Şekil 4.3. Si için E (enerji-eV) - n (kırılma indisi) grafiği



Şekil 4.4. Si için hv (enerji-eV) - k (sönüm katsayısı) grafiği

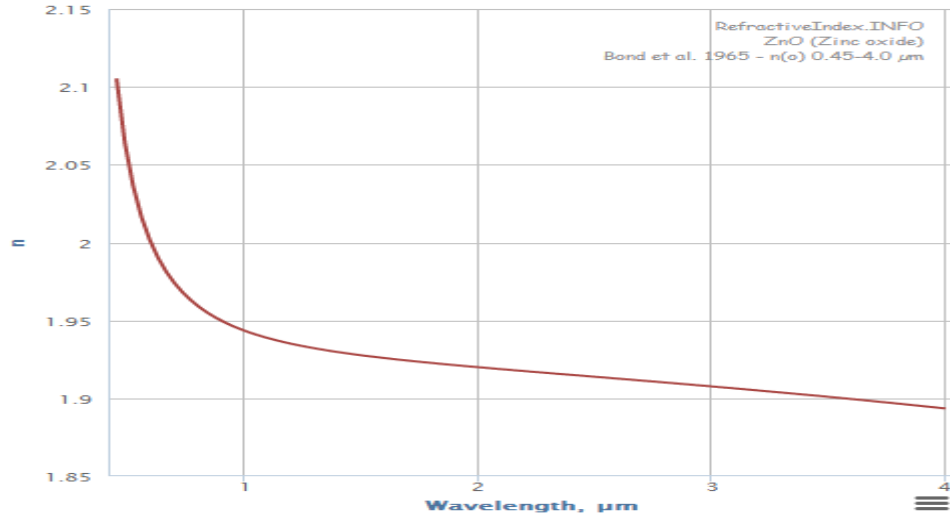


Şekil 4.5. Si için $h\nu$ (enerji-eV) - α (soğurma katsayısı) grafiği



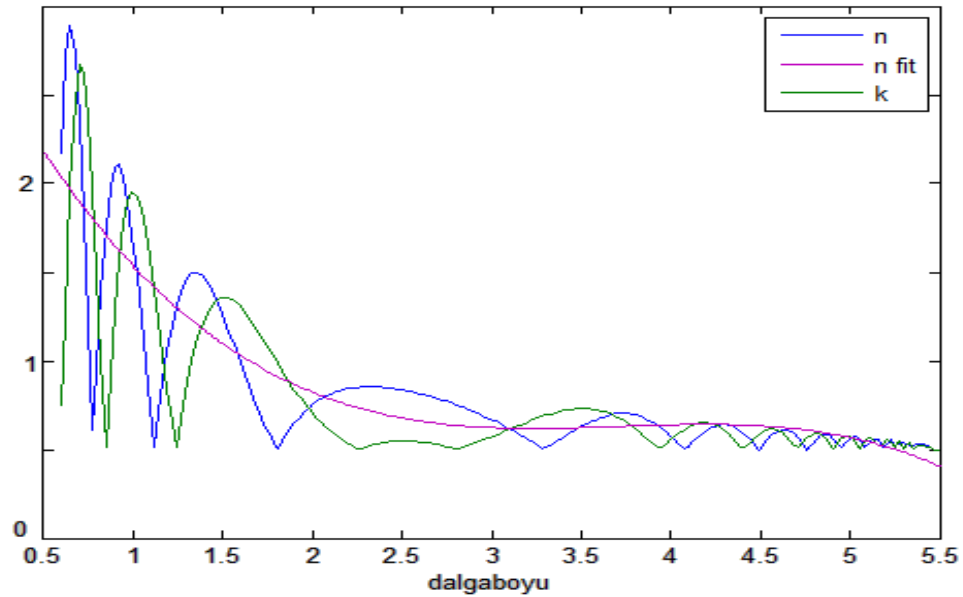
Şekil 4.6. Si için $h\nu$ (enerji-eV) - ϵ (dielektrik fonksiyon) grafiği

ZnO için bulunan sonuçlar şu şekildedir:

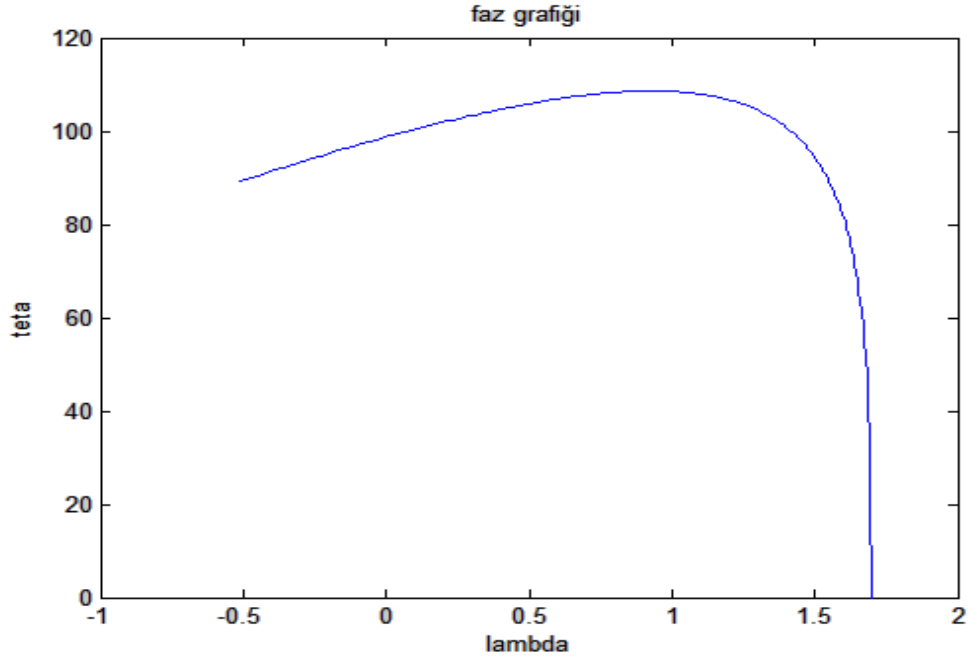


Şekil 4.7. Referans amaçlı literatürden eklenen ZnO için λ (dalga boyu) - n (kırılma indisi) grafiği (refractiveindex.info).

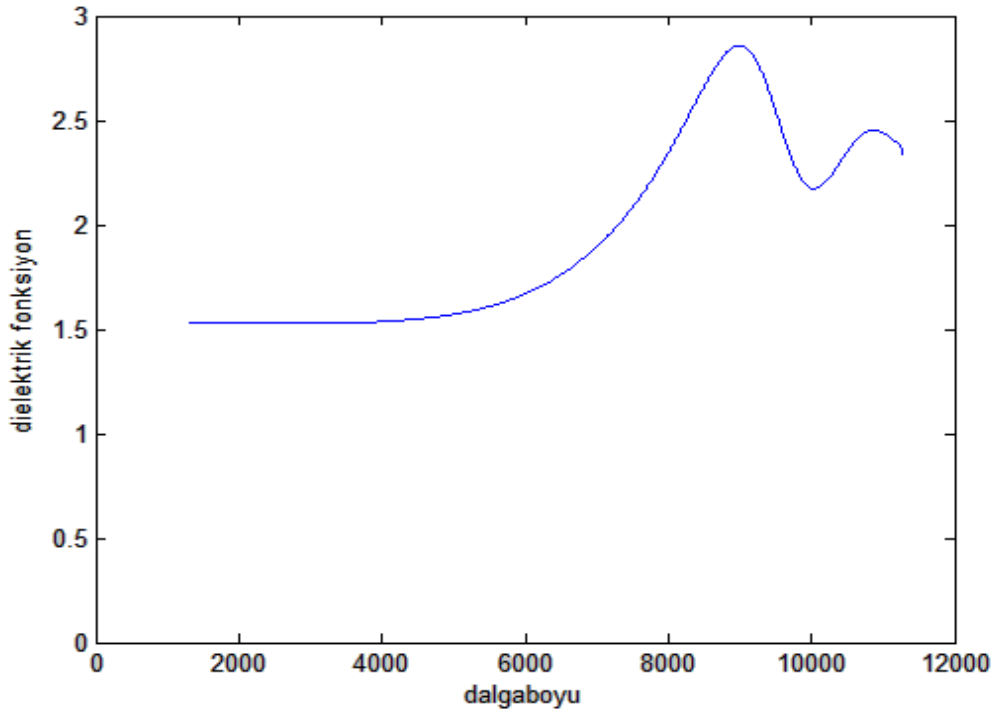
Matlab programı ile ZnO için elde edilen Kramers-Kronig verileri:



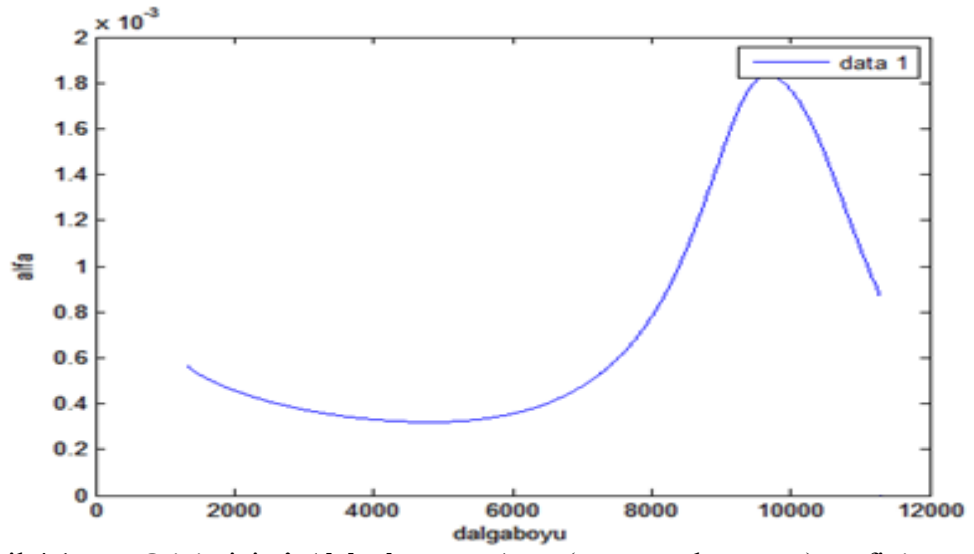
Şekil 4.8. ZnO için λ (dalga boyu- μm) - n (kırılma indisi) ve k (sönüm katsayısı) grafiği



Şekil 4.9. ZnO için λ (dalga boyu- μm) - θ (faz açısı) grafiği



Şekil 4.10. ZnO için λ (dalga boyu-nm) - ϵ (dielektrik fonksiyon) grafiği



Şekil 4.11. ZnO için λ (dalga boyu-nm) - α (soğurma katsayısı) grafiği.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma Kramers-Kronig dönüşümlerinin bir uygulamasıdır. Bu dönüşümler için yazılan bilgisayar programı test edilmiştir. Enerji veya dalgaboyunun fonksiyonu olarak yansıma verilerinden yola çıkılarak bazı optik parametreler hesaplanmıştır. Matlab'in fonksiyonel uygulamaları programa dahil edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar diferansiyele bağlıdır. Bu yöntem türev etkisini büyütmek üzere işlem yapar, yani ölçüm sırasında türeve etki olursa sonuçtan uzaklaşır.

Elde edilen grafikler ve veriler karşılaştırıldığında deneysel ve teorik değerler arasında iyi bir uyum saptanmıştır. Bu program sayesinde deneysel ölçümlere gerek kalmaksızın tek bir parametreden, diğer parametrelere geçiş yapılabilmektedir. Bu da zaman, maliyet ve emek açısından avantajlı bir durum sağlamakla birlikte, deneysel hatadan daha fazla arınmış sonuçlar vermektedir.

Bu program geliştirilerek daha başka parametreler bulunabilir. Tüm malzemelere uygulanır hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- AGHAMALYAN,N.R.,KAFADARYAN,E.A.,HOVSEPYAN,R.K.,PETROSYA
N,S.I.2004. Absorption and reflection analysis of transparent conductive
Ga doped ZnO films
- ASPINES D. E.,STUDNA A. A, 1982. Dielectric functions and optical parameters
of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb,InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 Ev
- CAFEROV, T., 2000, Katıhal Elektroniği. Y. T. Ü, Basım-Yayın Merkezi
Matbaası, İstanbul, 234s.
- CORS-TR Eğitim Seminerleri Serisi
- GODSALVE,C.,The Kramers-Kronig Relations (2012)
- GÜMÜŞ, C., ÖZKENDİR O. M., KAVAK H., UFUKTEPE Y., 2006,
Structuraland Optical Properties of Zinc Oxide Thin Films Prepared by
Spray Prolysis.
- JACKSON,J. D.Classical Electrodynamics, 3rd edition, John Wiley&Sons,
Inc.,NewYork
- JOHNSON,D.W. ,J. Phys. A, Math. Gen. 8, 490, (1975) Journal of
Optoelectronics and Advanced Materials, 8: 299-303.
- KESİK,B.,2011. Elektron Siklotron Rezonans Mikrodalga Plazma (ECR-MP)
Sistemi ile Yarıiletken Karbon Bileşiklerinin Üretilmesi ve
Karakterizasyonu. Ç.Ü.Fen Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- KITTEL, C., 1996. Katıhal Fizikine Giriş. Güven Kitap Yayın Dağıtım, İstanbul,
434s.
- LANDAU L. D.,LİFŞİTZ,E. M.Electrodynamics of Continuous Media, Oxford,
PergamonPress (1975).
- LUCARİNİ,V.,SAARİNEN,J.J.,PEIPONEN,K.,VARTIAİNEN,E.M.,2005,
Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research (Springer Series
in Optical Sciences)
- MANSUR,F., 2007.Püskürtme yöntemi ile hazırlanan SnO₂ ince filmlerin
özellikleri Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

- MEYER, R.J., 1972. Introduction to Classical and Modern Optics, Prentice-Hall, 471-478.
- MÍHALY, L. 2006 Spring Semester, Budapest University of Technology and Economics
- PANKOVE, J.I., 1971. Optical process in semiconductors. Dover Publications, Inc. New York, 422s.
- ŞENADIM, E., 2007. ZnO ince filmlerinin eldesi ve aygıt üretimi için parametrelerinin optimizasyonu Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi
- ŞENADIM, E., EKER, S., KAVAK, H., ESEN, R., 2006, Optical and Structural Parameters of The ZnO Thin Film Grown by Pulsed Filtered Cathodic
- TUMENAS, S., KASALYNAS, I., KARPUS, V., ARWIN, H., (2011), Infrared Reflectance Kramers-Kronig Analysis by Anchor-Window Technique Vacuum Arc Deposition. Solid State Communications 139: 479-484.
- WIKİPEDIA encyclopedia
- WOOTEN, F. Optical Properties of Solids, Academic Press, New York (1972).
- YAMAMOTO, K., ISHIDA, H., 1997, Kramers-Kronig Analysis Applied to Reflection-Absorption Spectroscopy
- <http://www.jawoollam.com/tutorial>

ÖZGEÇMİŞ

29 Mayıs 1988’de İzmir’de doğdu. İlköğretimi Ömer Özkan İlköğretim Okulu’nda, liseyi İzmir Yunus Emre Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Daha sonra Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü’nde eğitimine devam etti. Buradan 2011 yılında Tezsiz Yüksek Lisans derecesi ile mezun oldu. Aynı yıl Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2012-Eylül ayında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olmaya hak kazandı. Aynı bölüme yüksek lisans için yatay geçiş yapmış olup, görevine devam etmektedir.

EKLER

Ek 1: Oluşturulan Matlab Programı

```
veri=xlsread('Zno.xlsx');%excel dosyasının açılması
lambda=veri(:,1);
A=veri(:,2);
plot(lambda,A);
xlabel('lambda');
ylabel('R');
title('lambda-A grafiği');
noktasayi=numel(lambda);
difr=zeros(noktasayi,1);
difr= diff(A);
difr(noktasayi)=difr(noktasayi -1);
teta=zeros(noktasayi,1);
n=zeros(noktasayi,1);
v=zeros(noktasayi,1);
k=zeros(noktasayi,1);
teta1=zeros(noktasayi,1);
tetaorj= zeros(noktasayi ,1);
araterm=zeros(noktasayi,1);
farkw=zeros(noktasayi,1);
pay=zeros(noktasayi,1);
alfa=zeros(noktasayi,1);
d=zeros(noktasayi,1);
dielek=zeros(noktasayi,1);
%double (term);
%double (term1);
tetak=zeros(noktasayi,1);
tetasol=teta;
tetasag=teta;
pi=3.14;
c=3*10^8;
v=lambda;
u=0;
%fid=fopen('gizem.txt','w');
%fprintf("%5.2f  %5.2f\n",lambda,R);
%A=difr;
for i=1:1:(noktasayi-1)
    teta(i)=0;
    teta1(i)=0;
    tetasol(i)=0;
    tetasag(i)=0;
    term=0;
    term1=0;
    %i çiftse
```

```

        for j= 1:1:(noktasayi-1)
            deltar= v(j)- v(i) ;
            deltkarw=v(j)* v(j);
            deltkarw1= v(i)* v(i);
            if deltar >0
                term=log(A(j))/log(A(i));
                pay(j)=term;
                farkw(j)=1/(deltkarw-deltkarw1);
                term1 = term + term * 1/(deltkarw-deltkarw1);
                term = term + term * exp(-(abs(i-j))) ;
                araterm(j)=term ;
                tetak(i)=tetak(i)+1;
                teta1(i)=teta1(i)+ term1 ;
            end

            disp (teta(i)); disp(v(i))
        end

teta(i)=term1* v(i)/pi;
plot(lambda,araterm);
teta1(i)=0;
term=0;
term1=0;
for j= 1:1:i
    deltar= v(j)- v(i) ;
    deltkarw=v(j)* v(j);
    deltkarw1= v(i)* v(i);
    if deltar >0
        term=log(A(j))/log(A(i));
        pay(j)=term;
        farkw(j)=1/(deltkarw-deltkarw1);
        term1 = term + term * 1/(deltkarw-deltkarw1);
        term = term + term * exp(-(i-j)) ;
        araterm(j)=term ;
        tetak(i)=tetak(i)+1;
        teta1(i)=teta1(i)+ term1 ;
    end

    % disp (teta(i)); disp(v(i));
end
tetasol(i)=term1* v(i)/pi;
%disp(teta(i));
disp (teta(i)); disp(v(i));
for j= i:1:(noktasayi-1)
    deltar= v(j)- v(i) ;
    deltkarw=v(j)* v(j);

```

```

deltkarw1= v(i)* v(i);
if deltar >0
term=log(A(j))/log(A(i));
pay(j)=term;
farkw(j)=1/abs(deltkarw-deltkarw1);
term1 = term + term * 1/(deltkarw-deltkarw1);
term = term + term * exp(-(i-j)) ;
araterm(j)=term ;
tetak(i)=tetak(i)+1;
teta(i)=teta(i)+term;
teta1(i)=teta1(i)+ term1 ;
disp (teta(i)); disp(v(i));
end

tetasag(i)=term1* v(i)/pi;
disp(teta(i));
%teta(i)= deltar* teta(i)/ pi;
%fprintf('%5.2f  %5.2f\n',lambda,teta(i));

end

tetaorj(i)=teta(i);
fprintf('%5.2f  %5.2f\n',lambda,teta(i));
%plot(log(lambda),teta);
%xlabel('log lambda');
%ylabel('teta');
%title('faz grafiği');
R=A;
teta=teta ./ max(teta);
%tetasol=tetasol ./ max(tetasol);
%tetasag=tetasag ./ max(tetasag);

for i=1:1:noktasayi-2 % n ve k'nın hesaplanması
n(i)=(1-R(i))/(1+R(i)-2*sqrt((R(i)*cos(teta(i)))));
k(i)=-2*sqrt((R(i)*sin(teta(i))))/(1+R(i)- 2*sqrt((R(i)*cos(teta(i)))));
alfa(i)=4*pi*k(i)/lambda(i);
dielek(i)=n(i)^2

fprintf('%5.2f  %5.2f\n',lambda,n(i));
fprintf('%5.2f  %5.2f\n',lambda,k(i))

end
for i=1:1:noktasayi %n ve k'nın yazdırılması,lambda'ya göre değişim grafiğinin
çizilmesi
disp('n(i),k(i)');

```

```
plot(lambda,n);  
end  
fclose(fid);
```