

İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Elipsometrik Yöntemle Belirlenmesi

Gültekin ÇELİK¹, Haluk ŞAFAK¹

Özet: Bu çalışmada ince filmlerin optiksel karakterizasyonunda sıkça kullanılan polarimetrik bir yöntem olan Elipsometri tekniği incelenmiştir. Yapılan çalışmada bir elektromagnetik dalganın elipsometre düzeneği içerisindeki davranışı ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Daha sonra elipsometrik parametreler ve denklemler tanımlanmış ve her hangi bir ince film için kırılma indisi ve soğurma katsayısının elipsometrik yöntemle nasıl hesaplandığı açıklanmıştır.

Key Words: İnce Film, Elipsometri, Jones Hesaplaması

Determination of Optical Properties of Thin Films by Ellipsometry Technique

Abstract: In this study, the ellipsometry technique which has been used widely in characterisation of thin films are studied. Here, firstly the behaviour of electromagnetic wave within ellipsometry setup are investigated in details. Then, ellipsometrical parameters and related equations are introduced and method by which the refractive index and extinction coefficient of any thin film are determined, has been explained.

Key Words: Thin Film, Ellipsometry, Jones Calculation

Giriş

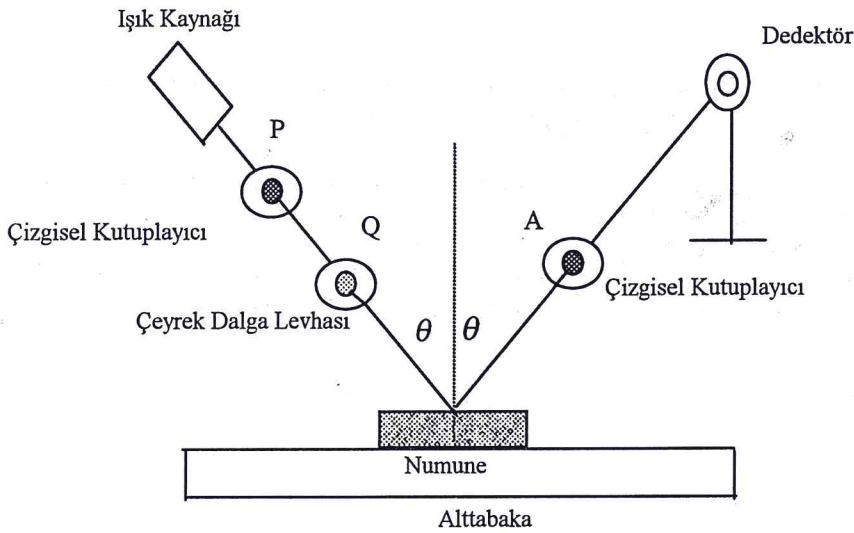
Malzemelerin fiziksel özelliklerinin araştırılması, son yüzyıl boyunca birbirinden farklı bir çok fizik alanının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu çeşitliliğin en büyük sebebi, bilimin kendisinin çok geniş bir alanı kapsaması ve her bir alanda çok farklı araştırma yöntemlerinin geliştirilmiş olmasıdır. Bu fizik dallarına en belirgin ve en önemli örnek olarak ince film fiziği verilebilir.

İnce film fiziği, diğer fiziksel özellikleri çok farklı olsa da tek ortak özelliği boyutlarının çok küçük olduğu yapılarla ilgilenir. İlgilendiği sistemlerin temel özellikleri birbirinden çok farklı olabildiği

¹ Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü (42031) Kampüs KONYA

gibi bu sistemleri inceleme yöntemleri de farklılık gösterir [1]. Bir ince film, kalınlığı yaklaşık olarak 50-2000 Å arasında değişen çok ince bir yapıdır. Kalınlık için verilen bu sınırlama kesin değildir. Bazı durumlarda, kalınlığı 2 Å a kadar düşen monomoleküler tabakalar veya 10000 Å' a kadar çıkan kalın filmler de ince film kategorisinde değerlendirilmektedir [2]. Bir ince film malzeme genelde bir alt tabaka olarak adlandırılan daha kalın bir yapı üzerine çok farklı fiziksel ve kimyasal yöntemler yardımıyla oluşturulur. Elde edilen ince film yapının temel özellikleri, büyütüldüğü malzemeye bağlı olduğu gibi alt tabakaya ve hazırlama yöntemlerine de çok sıkı bir şekilde bağlıdır. İnce bir filmde yansıyan ve geçen ışığın ilerlemesi ışığın normal ortamda ilerlemesinden farklıdır. Işığın bir filmde yansması ve kırılması, film kalınlığı, kırılma indisi, ve film soğurucu ise sönüm katsayısı gibi büyüklüklere bağlıdır.

Elipsometri ince filmlerin yüzey özelliklerinin tayin edilmesi için kullanılan hassas bir optik yöntemdir. Yansıma polarimetresi veya polarimetrik spektroskopi gibi adlarla da tanımlanan elipsometri ışığın kutuplanma durumu üzerinde yansıma etkisinin ölçümüne dayanır [3]. Yüzey incelemelerinde ve soğurucu ya da soğurucu olmayan destekler üzerindeki filmlerin polarimetrik yöntemle analizinde elipsometri tekniği artan bir hızla kullanılmaktadır [4,5,6,7]. Elipsometri deney düzeneğini oluşturan temel elemanlar şekil 1. de gösterilmiştir. Son yıllarda fiziksel parametrelerin kontrolü ve eş zamanlı analizi için bilgisayarların geniş şekilde kullanılması ve ince film karakterizasyon tekniklerindeki gelişmeler elipsometriyi çok yaygın ve tercih edilen bir yöntem haline getirmiştir.



Şekil 1. Elipsometri ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek. Şekilde P, polarizörün açısını ve A, Analizörün açısını göstermektedir.

Materyal ve Metot

Işığın bir elipsometreden geçerken kutuplanma durumunun hesaplanması matris yöntemine dayanır [8]. ω açılal frekansı ile +z yönünde ilerleyen monokromatik bir düzlem dalga

göz önüne alalım. Bu dalganın elektrik alanı $E = E_0 e^{i(\omega t - kx)}$ şeklinde verilebilir. E'nin gerçel kısmı herhangi bir t anında bir z noktasındaki anlık elektrik alan vektörünü, E_0 ise salınım yapan elektrik alan vektörünün genliğini temsil eder. İzotropik bir malzemede +z yönünde yayılan bir dalga için \vec{E}_0 , x-y düzleminde yer alan bir vektördür. Eğer ışığı $z = 0$ noktasında gözliyorsak bu ışık, Jones vektörü olarak bilinen iki elemanlı bir sütun matrisi ile temsil edilebilir.

$$\begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{pmatrix} e^{i\omega t} \quad (1)$$

Eğer elektrik alan doğrultusu x eksenini ile θ açısı yapacak şekilde çizgisel kutuplu ise E_{0x} ve E_{0y} bileşenleri aynı fazda olacak ve bu ışık için Jones vektörü

$$\begin{pmatrix} E_0 \cos\theta \\ E_0 \sin\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

şeklinde verilecektir. Işığın en genel kutuplanma durumu eliptik kutuplanmadır. Bu tür kutuplanmada elektrik alan vektörü, esas eksenini, x eksenini ile belirli bir açı yapan elips çizer. Bu genel durum için Jones vektörü

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

şeklinde ise bu durumda buna dik kutuplanmış ışık

$$\begin{pmatrix} -E_y^* \\ E_x^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_x ve E_y kompleks olup $e^{i\omega t}$ şeklinde zamana bağlıdır. Tamamen kutuplanmış bir ışık demeti için ışığın kutuplanmasını tanımlayan bir Jones vektörü yazmak her zaman mümkündür. Işığın elektrik alan vektörünün herhangi bir andaki gerçel değerini bulmak için kompleks niceliklerin gerçel kısımları alınmalıdır. Buna göre elektrik alanının x bileşeni,

$$R \operatorname{Re} [E_x e^{i\omega t}] \quad (5)$$

ve y bileşeni,

$$R \operatorname{Re} [E_y e^{i\omega t}] \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir.

Eğer sadece ışığın kutuplanma durumu ile ilgileniliyorsa ışığın iki bileşeninin bağıl genlikleri ve aralarındaki bağıl faz farkı önemlidir. Bu durumda elektrik alan vektörlerinin gerçel büyüklükleri ile gerçel fazlarına ilişkin bilgiler gözardı edilebilir. Bu şartlar altında aynı kutuplanma durumu için

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ E_y/E_x \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} E_x/E_y \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -E_x \\ -E_y \end{pmatrix} \quad (7)$$

şeklinde değişik gösterimler kullanılabilir. Elektrik alanların gerçel ve sanal kısımları sırasıyla E_{xr} , E_{yr} ve E_{xi} , E_{yi} şeklinde temsil edilirse

$$\begin{pmatrix} E_{xr} + iE_{xi} \\ E_{yr} + iE_{yi} \end{pmatrix} \quad (8)$$

yazılabilir.

Işık kutuplayıcı bir optik elemandan geçiyorsa bu ışığın kutuplanma durumu değişecektir. Dolayısıyla herhangi bir optik elemanı matematiksel olarak 2×2 şeklinde bir kompleks matris ile temsil edilebilir. Bu matris ilgili optik elemanın *Jones matrisi* olarak adlandırılır ve bir Jones vektörünü başka bir vektöre dönüştürür.

Optiksel soğurucu bir levhadan geçen bir ışığın kutuplanma durumu değişmez ancak birbirine dik iki kutuplanma bileşeninin genlikleri aynı miktarda azalır. Örneğin optik eleman soğurucu bir levha ise,

$$\begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix} \quad (9)$$

şeklinde bir Jones matrisi tanımlanabilir. Burada a , 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir. Optik geçirgenlik eksenini x eksenine üzerinde olan ideal bir çizgisel kutuplayıcı x yönünde kutuplanmış ışığın tümünü geçirirken y yönünde kutuplanmış ışığın tümünü soğuracaktır. Bu durumda bu kutuplayıcıyı temsil eden Jones matrisi

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ile verilir. Buradan,

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

elde edilir. Eğer ideal bir çizgisel kutuplayıcının optik eksenini x eksenine ile bir P açısı yapıyorsa geçen ışık için Jones vektörü

$$\begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} \quad (12)$$

matrisi ile verilir.

Işığın elipsometredeki kutuplanma durumundaki değişimleri matematiksel olarak tanımlamak her zaman mümkündür. Ancak bu durumda ışığın bir yüzeyden yansımalarını temsil eden matrisin bilinmesi gerekir. Eğer yansıma olayı ışığın kutuplanma durumunu bozmuyorsa bu durumda yansımaları temsil eden matris en genel olarak

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \quad (13)$$

şeklinde verilir. Burada R_{ij} ler yüzeyin yansıtma özelliklerini tanımlayan kompleks sayılardır.

Yansıtma matrisinin köşegen dışı elemanları optiksel özellikleri iyi tanımlı izotropik bir malzeme için sifıra eşittir. Böyle bir durumda yansıtma matrisi sadece numuneden yansıyan ışığın kutuplanma durumundaki değişimi temsil eden kompleks bir sayı içerir. Bu kompleks sayı $\rho = \frac{R_{11}}{R_{22}}$ şeklinde

tanımlanır ve yansıtma matrisi

$$R = \begin{pmatrix} \rho & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

şeklinde verilir. Yansıtma matrisi malzemenin optik özellikleri ile elipsometrenin sıfır ayarları arasında bir ilişki oluşturur. Malzemenin optik özellikleri biliniyorsa R matrisi hesaplanabilir. Diğer taraftan R matrisi elipsometrenin sıfır ayarlarını hesaplamak için kullanılabilir. Genellikle bu hesaplama işlemi ters yönde gerçekleştirilemez. Bazı özel durumlar hariç elipsometrenin sıfır ayarları R matrisinin elemanlarının hesaplanması için yeterli bilgi vermez. Ayrıca R nin elemanları belirlense bile bu sonuçlardan yola çıkarak numunenin optik özellikleri için tek bir değer seti tahmin edilemez. Dolayısıyla malzemenin özelliklerine ilişkin bazı bilgilerin mevcut olması veya bazı kabullerin yapılması, bu kabuller yardımı ile R nin elemanlarının belirlenmesi ve daha sonra R yi kullanarak elipsometrenin sıfır ayarlarının hesaplanması gerekir.

Bir düzlem dalganın gelme düzlemi içerisinde yer alan ve gelme düzlemine dik olan bileşenlerin arasındaki faz farklılığı eliptik kutuplanmaya yol açar. Genel olarak yansıma paralel ve dik bileşenlerin bağıl fazlarında ve genliklerinin oranlarında bir değişmeye neden olur. Yansımanın

etkisi, bağıl faz değişimi olarak tanımlanan Δ açısı ve genlik oranları ile ilişkili Ψ açısı ile belirlenir [9,10]. Gelen ve yansıyan demetin genlikleri E_i, E_r ve mutlak faz açıları δ ise elipsometrik parametreler olarak adlandırılan Δ ve Ψ parametreleri

$$\Delta = (\delta_{//} - \delta_{\perp})_r - (\delta_{//} - \delta_{\perp})_i \quad (15)$$

$$\Psi = \arctg (E_{r//} / E_{i//}) / (E_{r\perp} / E_{i\perp}) \quad (16)$$

şeklinde verilebilir. Kutuplayıcıyı geçtikten sonra bu çizgisel kutuplu ışık, hızlı eksen gelme düzlemi ile θ açısı yapacak şekilde yerleştirilmiş bir çeyrek dalga levhasından geçer. Eğer mükemmel bir çeyrek dalga levhası kullanılırsa numune üzerine düşen ışığın Jones vektörü

$$\begin{pmatrix} E_{//i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} \quad (17)$$

veya

$$\begin{pmatrix} E_{//i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos(P-\theta) + i\sin\theta \sin(P-\theta) \\ \sin\theta \cos(P-\theta) - i\cos\theta \sin(P-\theta) \end{pmatrix} \quad (18)$$

şeklinde olur. Bu Jones vektörü eliptik kutuplu ışığı temsil eder. Eğer herhangi bir P açı değeri için gelen ışığın paralel ve dik bileşenlerinin eşit genliklerde olması isteniyorsa θ açısının $\mp 45^\circ$ seçilmesi gerekir [11,12]. İzotropik malzemeler için ışığın malzemedan yansıdıktan sonraki kutuplanma durumu

$$\begin{pmatrix} E_{//r} \\ E_{\perp r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{//} & 0 \\ 0 & R_{\perp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{//i} \\ E_{\perp i} \end{pmatrix} \quad (19)$$

şeklinde verilir. Burada $E_{//r}$ ve $E_{\perp r}$ yansıyan ışığın elektrik alanının paralel ve dik bileşenleri için kompleks genlikler, $R_{//}$ ve R_{\perp} ise bu iki kutuplanma durumuna karşılık gelen kompleks yansımaya katsayılarıdır. Eğer malzemedan yansıyan ışık analizör tarafından tamamen sönecek şekilde görülüyorsa analizöre gelen ışığın çizgisel kutuplu olması gerekir. Bunun anlamı yansıyan ışık için Jones vektörünün her iki bileşeni de aynı fazda olmalıdır. Dolayısıyla bunların birbirine oranı reel bir sayı ile temsil edilmelidir. Buna göre tam bir sıfırlama olabilmesi için

$$R \left(\frac{E_{//r}}{E_{\perp r}} \right) = R \left(\frac{R_{//} E_{//i}}{R_{\perp} E_{\perp i}} \right) = 0 \quad (20)$$

şartı sağlanmalıdır.

Diğer taraftan bilindiği gibi elipsometrik ölçümlerde belirlenen parametre, paralel ve dik bileşenlerin bir birine oranı olan kompleks bir genlik yansımaya oranıdır. Bu kompleks sayı

$$\rho = \frac{\hat{E}_{//r}}{\hat{E}_{\perp r}} = \frac{R_{//} \hat{E}_{//i}}{R_{\perp} \hat{E}_{\perp i}} \quad (21)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $R_{//}$ ve R_{\perp} paralel ve dik akı yansıtma oranları, $\hat{E}_{//r}$ ve $\hat{E}_{\perp r}$ paralel ve dik yansıyan elektrik alan bileşenleri $\hat{E}_{//i}$ ve $\hat{E}_{\perp i}$ paralel ve dik gelen elektrik alan bileşenleridir. Bu kompleks yansımaya oranı genlik yansıtma katsayıları cinsinden

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} = \left(\frac{r_1^P + r_2^P e^{-2i\delta}}{1 + r_1^P r_2^P e^{-i\delta}} \right) / \left(\frac{r_1^S + r_2^S e^{-2i\delta}}{1 + r_1^S r_2^S e^{-i\delta}} \right) \quad (22)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadedeki ρ reel ve sanal kısımlarına ayrılarak denk.(23) deki gibi yazılabilir

$$\rho = \tan \Psi \exp(i\Delta) = \tan \Psi \cos \Delta + i \tan \Psi \sin \Delta \quad (23)$$

Bu ifadede $\tan \Psi$ yansıtma katsayılarının büyüklüklerinin oranı $\Delta = \Delta_{//} - \Delta_{\perp}$ ise paralel kutuplanmış ışığın $\delta_{//}$ fazının dik kutuplanmış ışığın δ_{\perp} fazına göre yansıma ile oluşan bağıl değişimini gösterir. Bu iki ifade birleştirilirse elipsometri de tam bir sıfırlama elde etmek için kutuplayıcı açısının

$$\tan (2P - 2\theta) = -\sin 2\theta \tan \Delta \quad (24)$$

şartını sağlaması gerektiği görülür. Bu şart $(0-360)^\circ$ aralığında tam bir sıfırlama olması için $2P - 2\theta$ büyüklüğünün iki değere sahip olmasını gerektirir. Bu aralıkta P açısının dört değeri vardır. Bunlardan ikisi

$$P = \frac{1}{2} \arctan (-\sin 2\theta \tan \Delta) + \theta \quad (25)$$

$$P = \frac{1}{2} \arctan (-\sin 2\theta \tan \Delta) + \theta + \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

şeklinde dir. Diğer ikisi ise bu değerlerden π kadar farklıdır. P için verilen bu iki değer Δ ve θ nin değerlerine bağlı olmaksızın bir birinden $\frac{\pi}{2}$ kadar farklıdır. Buna göre malzemeden düzlemsel

kutuplanmış şekilde yansıyan ışık oluşturacak P değeri için analizörden geçen ışığın minimum olduğu (sıfırlandığı) bir A değeri her zaman mevcuttur. Malzeme yüzeyinden yansıyan ışığın kutuplanmasını temsil eden Jones vektörü

$$\begin{pmatrix} E_{//r} \\ E_{\perp r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{//} E_{//i} \\ R_{\perp} E_{\perp i} \end{pmatrix} \quad (27)$$

şeklinde dir. Buna göre analizör bir A açısına ayarlandığında tam bir sıfırlama elde ediliyorsa malzemeden yansıyan ışığın Jones vektörü üzerine etki eden A açılı analizörün Jones matrisinin bir sıfır vektörü oluşturması beklenir. Yani

$$\begin{pmatrix} \cos^2(A) & \sin(A) \cos(A) \\ \sin(A) \cos(A) & \sin^2(A) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p r \\ E_s r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

olmalıdır. Bu matris denklemini iki özdeş cebirsel ifade verir. Her iki ifade kullanılırsa

$$\tan A = -\frac{E_{//r}}{E_{\perp r}} \quad (29)$$

olması gerektiği görülür. Bu ifade ise sonuçta

$$\tan A = -\frac{R_{//} E_{//i}}{R_{\perp} E_{\perp i}} = -\rho \frac{E_{//i}}{E_{\perp i}} \quad (30)$$

ifadesine götürür. Bu sonuç yukarıdaki denklemle birlikte tam bir sıfırlama durumunda Ψ ile A açısı arasında bir ilişki oluşturmasına izin verir. Elde edilecek ifade oldukça karmaşık olup

$$\tan A = \tan \Psi \frac{\cos(2P-2\theta)\cos\Delta\sin 2\theta - \sin(2P-2\theta)\sin\Delta}{\cos(2P-2\theta)\cos 2\theta - 1} \quad (31)$$

şeklindedir. Δ ve P açısı arasındaki ilişki sıfırlama durumunda bu denklemi biraz basitleştirir. Yukarıda hesaplanan her P açısı için bir A açısı bulunacaktır. A açısı 180° veya tam katlarında iken çözümü sağlar ve tam bir sıfırlama elde edilir.

Denk.(23) çok fazla sayıda bilinmeyen içermektedir. Dolayısıyla bu ifade yardımıyla filmin kırılma indisinin belirlenmesi için diğer bir takım parametrelerin (örneğin film kalınlığının, alt tabakanın kırılma indisinin veya filmin soğurma katsayısının) biliniyor olması yada başka yöntemlerle belirlenmesi gerekir. Eğer metal veya dielektrik bir soğurucu film söz konusu ise malzemenin kırılma indisi $\hat{n} = n - ik$ şeklinde kompleks bir sayı olacaktır. Bu durumda filmin sönüm katsayısı da büyük öneme sahip olur.

Denk.(22)'de kullanılan parametrelerin bir kısmı deneysel olarak önceden bilinen parametrelerdir. Örneğin gelme açısı ve ışığın dalgaboyu bilinmektedir. Diğer taraftan kırılma açıları Snell bağıntısı kullanılarak gelme açısına ve ortamların kırılma indislerine bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin hava-film ve film-alt tabaka arayüzlerinde kırılma açıları Snell bağıntısı yardımıyla kolayca bulunabilir. n_2 ve n_3 ise sırasıyla film ve alt tabakanın kırılma indisleridir. Pratik uygulamalarda alt tabaka olarak seçilen malzeme genellikle bir cam malzemedir. Bu nedenle n_3 reel olarak kabul edilebilir. Sonuçta sadece filmin kırılma indisi n_2 kompleks bir sayıdır. Eğer alt tabakanın n_3 kırılma indisi biliniyorsa, belirlenmesi gereken parametre sayısı üç'e indirgenir. Bunlar ise filmin optik parametreleri olan filme ait kırılma indisi n_2 , sönüm katsayısı k_2 , ve d film kalınlığıdır.

Bir elipsometri düzeneğinde dedektördeki ışık şiddetinin sıfır olmasını sağlayan P ve A kutuplayıcı açıları teorik elipsometrik parametrelere

$$P = -\frac{\Delta}{2} \mp \frac{\pi}{4} \quad (32)$$

$$A = \mp \Psi \quad (33)$$

şeklinde bağlıdır. Bu ifadelerden faydalanarak ve A ile P açılarını kullanarak Ψ ve Δ parametreleri belirlenir daha sonra bulunan bu parametreler ve Denk.(22) kullanılarak, aranan n_2 , k_2 ve d büyüklükleri tayin edilmeye çalışılır. Eğer doğrultusu bilinen çizgisel kutuplu ışık bir malzeme üzerine gönderilerek yansıtılırsa yüzeyden yansıyan ışık eliptik kutuplu olur. Elipsin şekil ve yönelimi gelme açısına, gelen ışığın kutuplanma doğrultusuna ve yüzeyin yansıma özelliklerine bağlıdır. Genel olarak yansıma paralel ve dik bileşenlerin bağıl fazlarında ve genliklerinin oranlarında bir değişmeye neden olur. Yansımanın etkisi, bağıl faz değişimi olarak tanımlanan Δ açısı ve genlik oranları ile ilişkili Ψ açısı ile belirlenir [9,10].

Kutuplayıcının optik geçirgenlik eksenini ile ışığın gelme düzlemi arasındaki açı bir prizma yardımı ile hassas bir şekilde ayarlanabilir. Eğer bu açı gelme düzleminden kutuplayıcıya doğru alınırsa pozitif değerdedir. Mükemmel bir çeyrek dalga levhası ile ışığın birbirine dik iki bileşeni arasında 90° lik bir faz kayması oluşturulur. Eğer malzeme izotropik ise çeyrek dalga levhası $\mp 45^\circ$ ye ayarlanarak bazı basitleştirmeler sağlanabilir. Bu durumda sadece kutuplayıcı ve çeyrek dalga levhasının açıları değiştirilerek dedektördeki ışık şiddeti sıfıra düşürülebilir. Bir sıfır ölçümünde iki temel sayı belirlenir. Bunlar kutuplayıcının (P) ve analizörün (A) açısal ayarlarıdır. Bu iki parametreden numuneye ait iki temel özellik belirlenebilir. Bu özellikler ise kırılma indisi ve sönüm katsayısıdır. Eğer bilinen alt tabaka üzerinde geçirgen bir film varsa kırılma indisi ile birlikte film kalınlığı da ölçülebilir.

Sonuçlar ve Tartışma

Katı bir hacimli maddenin ve ince filmlerin optik parametrelerini belirlemede bir çok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler birbirlerinden duyarlılık, deneysel elverişlilik ve parametrelerin tek bir frekans yada bir frekans aralığında ölçülmesine göre ayırt edilebilirler [13,14]. İnce filmlerin tüm fiziksel özellikleri, örneğin mekanik dayanıklılığı, elektriksel iletkenliği, yansıtma gücü ve geçirgenliği gibi optik özellikleri filmlerin yapısına bağlıdır. Bu nedenle filmin parametrelerini ölçmek için çok farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler genelde üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; mekanik yöntemler, elektriksel yöntemler ve optik yöntemlerdir. Mekanik yöntemler, film kalınlığının çok küçük olması durumunda yeterli duyarlılıkta kalınlık tayinine imkan sağlamazlar. Elektriksel yöntemler ise film üzerine kontak yapılmasını gerektirdiğinden film yapısında kaçınılmaz bozulmalara yol açar ve ayrıca fiziksel parametrelerin analizinde yapılan kantağın özelliklerinin de iyi bilinmesi gerekliliğini ortaya koyarlar. Bu iki yöntem belirtilen bu dezavantajlardan dolayı genellikle ince film karakterizasyonunda fazlaca kullanılmazlar. Daha çok filme direk temas gerektirmeyen dolayısıyla daha hassas ve sağlıklı sonuçlar veren optik yöntemler tercih edilir [15,16,17,18]. Optik yöntemlerin içersinde polarimetrik yöntem gerek ölçümlerdeki hassasiyet gerekse sonuçların daha duyarlı elde edilmesi açısından önemlidir.

Polarimetrik bir yöntem olan elipsometrinin önemli bir üstünlüğü, özellikle ince film yapıların büyütülmesi esnasında yüzey kalitesinin, film kalınlığının ve dielektrik özelliklerinin eş zamanlı olarak kontrol edilmesine imkan sağlamasıdır. Çünkü elipsometrik ölçümler çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Spektroskopik elipsometri yönteminin önemli bir kullanım alanı da çok ince kalınlıktaki yapıların dielektrik fonksiyonlarının tam tayin edilmesidir [19]. Bu yöntem yardımıyla birkaç atomik tabaka kalınlığındaki yarı iletken filmlerin bile gerçek dielektrik fonksiyonları hassas biçimde belirlenebilmektedir. Özellikle en küçük kareler regresyon analizi ile birleştirildiğinde spektroskopik elipsometri yöntemi i) Çok tabakalı yapıların kalınlık profili ii) Her bir tabakanın kalınlık ve bileşimi iii) Her tabakadaki kristallik derecesi iv) Muhtemel bir üst kirlenme tabakasının kalınlık ve özellikleri v) Yüzeyin mikro yapıdaki pürüzlü tabakasının kalınlığı hakkında önemli nitel bilgiler sağlayabilmektedir. Homojen olmayan geçirgen filmlerde, bu yöntem yardımıyla film içerisindeki boşluk kusurlarının dağılımı mükemmel bir şekilde belirlenebilmektedir.

Kaynaklar

- 1- Coombe, R.A. **The Electrical Properties and Applications of Thin Films** Sir Isaac Pitman and Sons Ltd. London (1967)
- 2- Eckertova, L. **Physics of Thin Films** Plenum Press New York (1986)
- 3- Kavcar, N. **İnce filmlerde optik yöntemlere kısa bir bakış** C.Ü. Fen-Edebiyat Fak. Fen Bil. Der. 3 Sivas (1985)
- 4- Burtchaousky, E.G. **Ellipsometric Method for Investigation of the Optical Anisotropy of Thin Films: Theory and Calculations** Thin Solid Films 307:192-199 (1997)
- 5- Jungk, G., Jahne, E. **Optical Properties of Film-Substrate Systems with an Anisotropic, Spatially Varying Dielectric Function of the Surface Layer** Thin Solid Films 348: 279-284 (1999)
- 6- Chen, J.J., Un, J. Sheu, L.J. **Simultaneous Measurement of Spectral Optical Properties and Thickness of an Absorbing Thin Film on a Substrate** Thin Solid Films 354: 176-186 (1999)
- 7- Walsh, C.B., Franses, E.I. **Thickness and Quality of Spin - Coated Polymer Films by two-Angle Ellipsometry** Thin Solid Films 347: 167-177 (1999)
- 8- Smet, De. D.J. **Generalized Ellipsometry and 4x4 Matrix Formalism** Surface Science 56 293-306 (1976)
- 9- Nee, F.S.M., Cole, T. **Effects of Depolarization of Polarimetric Components on Null Ellipsometry** Thin Solid Films 313-314: 90-96 (1998)

- 10- Gustin, K.M. **Optical Characterization of Low-Index Transparent Thin Films on Transparent Substrates by Spectroscopic Ellipsometry** Applied Optics 18:26 (1987)
- 11- Röseler, A., Korte, E.H. **Ellipsometric ATR Spectroscopy for Measuring the Infrared Refractive Index.** Journal of Molecular Structure Vol.349 (1995)
- 12- Bertucci, S., Pawlowski, A., Nicolas, N., Johann, L., El Ghemmaz, A., Stein, N., Kleim, R. **Systematic Errors in Fixed Analyzer Spectroscopic Ellipsometry** Thin Solid Films 313-314 73-78 (1998)
- 13- Holland, L. **Vac. Dep. of Thin Films** 4. ed..., Chapman- Hall Ltd. London (1961)
- 14- Rivory, J. **Le Vide** 191, 77-84 (1978)
- 15- Dignam, J.M. **Fourier Transform Polarization Spectroscopy** Canada (1988)
- 16- Khashan, M.A., Naggar, A.M. **A New Method of Finding the Optical Constants of a Solid From the Reflectance and Transmittance Spectrograms of its Slab Optics Communications** 174: 445-453 (2000)
- 17- Kildemo, M., Ossikowski, R., Stchakowsky, M. **Measurement of the Absorption Edge of Thick Transparent Substrate Using the Incoherent reflection Model and Spectroscopic U.V.-Visible Near I.R. Ellipsometry** Thin Solid Films 313-314 108-113 (1998)
- 18- Lekner, J. **Determination of Complex Refractive Index and Thickness of a Homogeneous Layer by Combined Reflection and Transmission Ellipsometry** J.Opt. Soc. Am. A , 2157 (1994)
- 19- Hoarmans, M.T., Bedeaux, D. **Optical Properties of Thin Films up to Second Order in the Thickness** Thin Solid Films 258 213-223 (1994)

