

Bir Cam Malzemenin Kırılma İndisinin Elipsometrik Yöntemle Belirlenmesi

Gültekin ÇELİK¹, Haluk ŞAFAK¹

Özet: *Bu çalışmada bir cam malzemenin kırılma indisi elipsometri yöntemi ile belirlenmiştir. Yapılan çalışmada Laser ışık kaynağı kullanılarak değişik gelme açılarında ölçümler alınmıştır. Bulunan deneysel parametreler bilgisayar ortamında değerlendirilerek cam malzemenin kırılma indisi hesaplanmıştır. Bulunan sonuçların literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.*

Anahtar Kelimeler : **Elipsometri, kırılma indisi, Jones Hesaplaması**

Determination of Refractive Index of a Glass Material by Ellipsometry Technique

Abstract: *In this study, refractive index of a glass material was determined by ellipsometry technique. By using a laser as a light source several measurements were performed for various incidence angles. The experimental parameters obtained were analysed by a computer program, and the refractive index of glass material was calculated. It was found that the results are in agreement with the literature.*

Key Words: **Ellipsometry, refractive index, Jones Calculation**

Giriş:

Günümüzde yüzey incelemeleri ve soğurucu yada soğurucu olmayan destekler üzerindeki filmlerin polarimetrik yöntemle incelenmesinde elipsometri yöntemi gittikçe artan bir oranda kullanılmaktadır [1,2,3,4]. Elipsometri eliptik kutuplanmış ışığın ölçümü ve analizine dayalı deneysel bir tekniktir. Yansıma polarimetresi veya polarimetrik spektroskopi gibi adlarla da tanımlanan

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

elipsometri ışığın kutuplanma durumu üzerinde yansıma etkisinin ölçümüdür [5]. Elde edilen ölçümler malzemenin optik özellikleri hakkında bilgi verir.

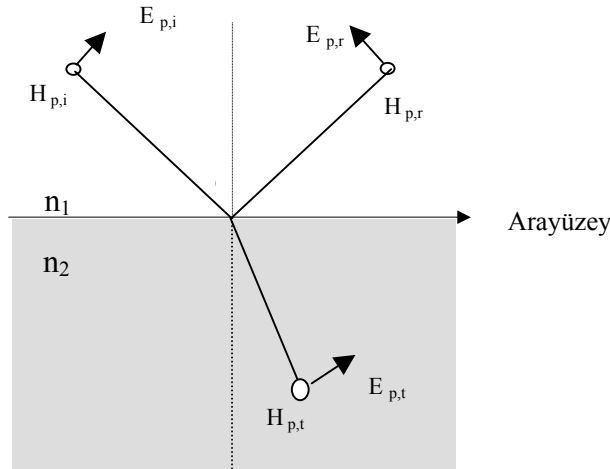
Bilindiği gibi spektroskopik elipsometri (SE) yöntemi bir elektromagnetik dalganın iki farklı ortamı ayıran arayüzeyden yansıması durumunda kutuplanma halindeki değişimi ölçer. Optik özelliklerin tayini genelde iki veya üç fazlı modellere dayalı olarak gerçekleştirilir. Boşluk ve malzemedeki oluşan iki fazlı basit bir ortamda yüzey etkileri ihmal edildiğinde homojen malzemenin hacimsel (bulk) dielektrik fonksiyonu oldukça basittir ve

$$\hat{\epsilon} = \text{Sin}^2\phi \left[1 + \tan^2\phi \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2 \right] \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [6]. Burada ρ yukarıda belirtilen ışığın arayüzeyde yansımasıyla kutuplanma durumunda oluşan değişimi temsil eden temel bir parametredir. ϕ ise ışığın yüzeye gelme açısıdır. Bu çalışmada laboratuvar ortamında tasarlanıp gerçekleştirilen basit bir elipsometri düzeneğini test etmek amacıyla bir cam malzemenin kırılma indisi elipsometri yöntemiyle belirlenmiştir. Cam malzeme hazırlanan düzenekte numune yerine konulmuştur. Dolayısıyla elipsometrik ölçümler hava ve malzemedeki oluşan iki fazlı model göz önüne alınarak yapılmış ve malzeme için dielektrik fonksiyonu olarak denk.1 ifadesi kullanılmıştır.

Materyal ve Metot

Elektromagnetik dalgaların farklı iki ortamı ayıran bir ara yüzeyde kutuplanma durumunun nasıl değişeceği Fresnel denklemleri kullanılarak incelenebilir. Bilindiği gibi Fresnel denklemleri kırılma indisleri farklı iki ortamı ayıran bir ara yüzeye gelen, yansıyan ve ikinci ortama geçen dalgaların elektrik alanlarının genlikleri arasındaki ilişkinin bulunmasına izin verirler. Bu denklemler elektromagnetik dalganın elektrik alanının gelme düzlemine dik ve paralel gelmesi şeklinde iki durum için ayrı ayrı incelenir. İlk olarak arayüzeye gelen elektromagnetik dalganın elektrik alan bileşeninin gelme düzlemine paralel olduğu durum gözönüne alınsın. Bu durumda kutuplanma durumu bir "p" alt indisi ile gösterilir. Elektrik alan bileşeninin gelme düzlemine dik olduğu kutuplanma durumu ise "s" alt indisi ile gösterilsin.



Şekil 1: Kırılma indisleri farklı iki ortamı ayıran arayüzeye elektrik alan vektörünün paralel gelmesi durumunda arayüzeyde elektrik alan ve magnetik alan vektörlerinin yönelimleri.

Şekil. 1 de ortamları ayıran arayüze gelen ışık demetinin elektrik alan bileşeni $E_{p,i}$ ile gelme ortamının kırılma indisi n_1 , ikinci ortamın kırılma indisi ise n_2 ile gösterilmiştir. Gelen demetin bir kısmı bu arayüzde yansıyor ve bir kısmı da ikinci ortama geçecektir. Bu durumda yansıyan demetin elektrik alan bileşenini $E_{p,r}$ ve ikinci ortama geçen demetin elektrik alan bileşeni de $E_{p,t}$ ile gösterilsin. Buradan mutlak yansıma oranı,

$$r_p = \frac{E_{p,r}}{E_{p,i}} \quad (2)$$

ve mutlak geçme oranı,

$$t_p = \frac{E_{p,t}}{E_{p,i}} \quad (3)$$

ile verilir.

Elektrik alan ve magnetik alan bileşenlerinin birbirlerine dik ve aralarında $H = n.u \times E$ şeklinde bir bağıntı olduğu bilinmektedir. İfadedeki u , ışığın yönelimindeki birim vektörü, n ise kırılma indisini göstermektedir. Şekil 1. den arayüze gelen demetin elektrik alan vektörünün paralel bileşeni için $E_{p,i} \cos \theta_1$, yansıyan demetin elektrik alan vektörünün paralel bileşeni için $E_{p,r} \cos \theta_1$ ve ikinci ortama geçen demetin elektrik alan vektörünün paralel bileşeni için de $E_{p,t} \cos \theta_2$ yazılabileceği görülebilir. Sınır şartlarını kullanarak elektrik alan vektörünün paralel bileşeni için,

$$E_{p,i} \cos \theta_1 - E_{p,r} \cos \theta_1 = E_{p,t} \cos \theta_2 \quad (4)$$

eşitliği yazılabilir. Aynı şekilde magnetik alan vektörünün arayüze paralel bileşeni için de

$$H_{p,i} + H_{p,r} = H_{p,t} \quad (5)$$

eşitliği yazılabilir. $H = n \cdot E$ ifadesi denk. (5) de yerine yazılırsa

$$n_1 E_{p,i} + n_1 E_{p,r} = n_2 E_{p,t} \quad (6)$$

elde edilir. Bu iki denklem birleştirilerek mutlak yansıma ve mutlak geçme oranları için,

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (7)$$

$$t_p = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (8)$$

ifadeleri elde edilir. Burada ortamların kırılma indisleri ve gelme açısı θ_1 biliniyorsa Snell kanunundan faydalanılarak θ_2 kolayca bulunabilir. Mutlak yansıma ve geçme oranları daha açık bir biçimde denk. (9) ve denk.(10) da olduğu gibi verilir.

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \sqrt{1 - \frac{n_1^2 \sin^2 \theta_1}{n_2^2}}}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{1 - \frac{n_1^2 \sin^2 \theta_1}{n_2^2}}} \quad (9)$$

$$t_p = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \sqrt{1 - \frac{n_1^2 \sin^2 \theta_1}{n_2^2}}} \quad (10)$$

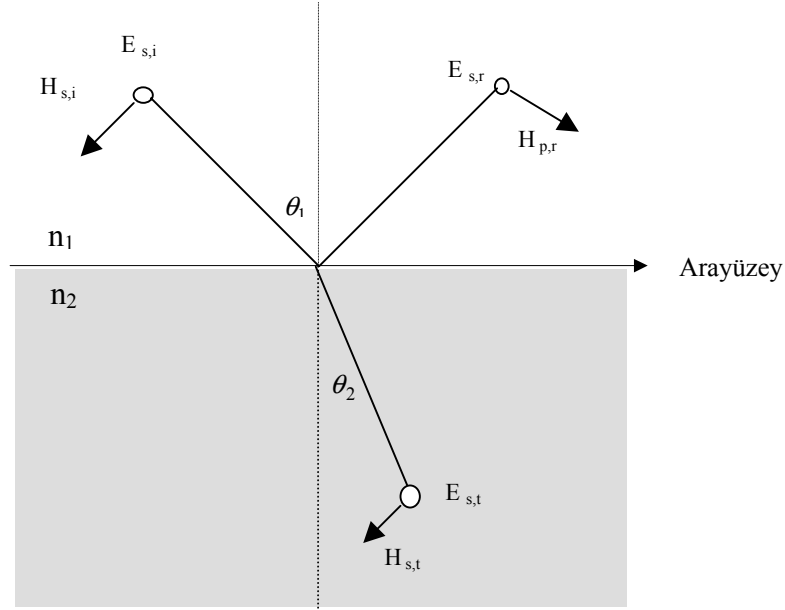
Bu ifadelerde gerekli kısaltmalar ve θ_2 'ye göre düzenlemeler yapılırsa yansıma ve geçme oranları en sade biçimde

$$r_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (11)$$

ve

$$t_p = \frac{2 \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Elde edilen bu sonuçlar n_2 nin kompleks olduğu durumlarda geçerlidir.



Şekil 2 : Kırılma indisleri farklı iki ortamı ayıran arayüzeye elektrik alan vektörünün dik gelmesi durumunda arayüzeyde elektrik alan ve magnetik alan vektörlerinin yönelimleri.

Şekil 2. den de görüldüğü gibi elektrik alan vektörünün arayüzeye paralel bileşeni için,

$$E_{s,i} + E_{s,r} = E_{s,t} \quad (13)$$

ifadesi yazılabilir. Magnetik alanının paralel bileşeni için de

$$-H_{s,i} \cos \theta_1 + H_{s,r} \cos \theta_1 = H_{s,t} \cos \theta_2 \quad (14)$$

bulunur. $H = n.E$ ifadesi yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa

$$-n_1 E_{s,i} \cos \theta_1 + n_1 E_{s,r} \cos \theta_1 = n_2 E_{s,t} \cos \theta_2 \quad (15)$$

elde edilir. Bu iki denklem birleştirilerek mutlak yansımaya ve mutlak geçme oranları için

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (16)$$

$$t_p = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (17)$$

ifadeleri elde edilir. Yine Snell kanunundan faydalanarak mutlak yansımaya ve geçme oranlarını daha açık bir şekilde denk. (18) ve denk.(19) de olduğu gibi yazmak mümkündür.

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (18)$$

ve

$$t_p = \frac{2 n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (19)$$

Benzer şekilde bu ifadelerde gerekli kısaltmalar ve θ_2 ye göre düzenlemeler yapılırsa yansıma ve geçme oranları en sade biçimde

$$r_p = - \frac{\sin (\theta_1 - \theta_2)}{\sin (\theta_1 + \theta_2)} \quad (20)$$

ve

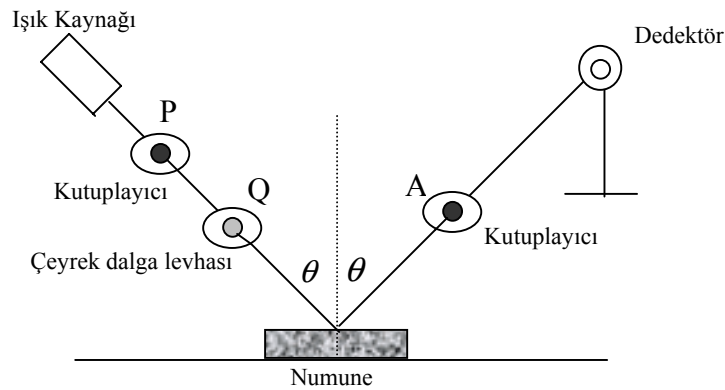
$$t_p = \frac{2 \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\sin (\theta_1 + \theta_2)} \quad (21)$$

şeklinde yazılır.

$\theta_1 = \theta_2 = 0$ durumunda p ve s kutuplanmış ışık için geçme katsayıları oranı aynı olacaktır. Fakat yansıma katsayıları birbirinden farklı olup p kutuplanmış ışığın yansıma katsayıları oranı s kutuplanmış ışığa göre negatiftir. Buraya kadar herhangi bir elektromanyetik dalganın bir ara yüzeye paralel ve dik gelmesi durumunda yansıma ve geçme oranları elde edildi. Elde edilen bu sonuçlar elipsometrik denklemleri ve parametreleri tanımlamak için kullanılacaktır.

Elipsometri Yöntemi

Elipsometri deney düzeneğini oluşturan elemanlar Şekil 3. de gösterilmiştir. Bu düzenek bir ışık kaynağı, 2 adet çizgisel kutuplayıcı, bir adet çeyrek dalga geciktiricisi, (0-360)° dönebilen tabla, numune ve dedektörden oluşmaktadır [7].



Şekil 3. Elipsometri ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenek

Sistemin temelinde ışık kaynağından çıkan kutupsuz ışık ilk önce bir çizgisel kutuplayıcıdan geçirilerek çizgisel kutuplanmış, daha sonra bir çeyrek dalga geciktiricisinden geçirilerek eliptik kutuplanmış. Numune üzerine gelen eliptik kutuplu ışık daha sonra yine bir çizgisel kutuplayıcıdan

geçirilerek dedektör üzerine düşürülmüştür. Buradaki kutuplayıcının optik geçirgenlik eksenini ile ışığın gelme düzlemi arasındaki açı bir prizma yardımı ile hassas bir şekilde ayarlanabilir. Eğer bu açı gelme düzleminde kutuplayıcıya doğru alınır pozitif değerdedir. Burada 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 45° ye ayarlanarak bazı basitleşmeler sağlanabilir. Bu durumda sadece kutuplayıcı ve analizörün açıları değiştirilerek dedektördeki ışık şiddeti sifıra 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 kırılma indisi ile sönüm katsayısıdır.

Bir düzlem dalganın, gelme düzlemi içersinde 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. Gelen ve yansıyan demetin genlikleri E_i , E_r ve mutlak faz açıları δ ise elipsometrik parametreler olarak adlandırılan Δ ve Ψ arasında

$$\Delta = (\delta_p - \delta_s)_r - (\delta_p - \delta_s)_i \quad (22)$$

$$\Psi = \arctg (E_{r,p} / E_{i,p}) / (E_{r,s} / E_{i,s}) \quad (23)$$

ilişkisi vardır. Yansıyan dalganın E_r elektrik alan vektörünün gelen dalganın E_i elektrik alan vektörüne oranı *Fresnel yansıtma katsayısı* olarak bilinir ve genelde kompleksdir. Gelen ve yansıyan dalganın genlikleri E_i , E_r ve yansımadaki faz değişimi δ olmak üzere

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{E_r}{E_i} e^{i\delta} = |r| e^{i\delta} \quad (24)$$

yazılabilir. $|r|$ gerçel bir büyüklüktür. Bileşen dalgalar için r_p ve r_s ile gösterilen iki yansıtma katsayısının oranı, elipsometrik parametreler cinsinden

$$\frac{r_p}{r_s} = \frac{E_{p,r}}{E_{p,s}} \frac{E_{s,i}}{E_{p,i}} e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \tg \Psi e^{j\Delta} \quad (25)$$

şeklinde olup burada $|r|$ genlik yansıtma katsayısı ve δ yansımadaki mutlak faz değişimidir.

Elipsometri teorisinde yer alan bir çok parametreler keyfi tanımlama ve seçime bağlıdır. Örneğin Ψ gerçel bağıl genlik oranının tanımı iki farklı şekilde verilebilir.

$$\tg \Psi = \left| \frac{r_s}{r_p} \right| \quad (26)$$

$$\tg \Psi = \left| \frac{r_p}{r_s} \right|$$

Bu iki açı birbirinin tümlenendir. Δ içinde denk. (27) de ki gibi iki tanım vardır,

$$\begin{aligned} \Delta &= \delta_p - \delta_s \\ \Delta &= \delta_s - \delta_p \end{aligned} \quad (27)$$

Burada tanımlanan Ψ ve Δ büyüklüklerine *Jones kutuplanma parametreleri* denir. Eğer ışık vektörünün bilinmesiyle; elipsin yönelimi, şekli ve dönme yönü biliniyorsa eliptik kutuplu bir ışık demetinin kutuplanma durumu tamamen belirlenebilir. Bir elipsometrik düzende, dedektördeki ışık şiddetinin sıfır olmasını sağlayan P ve A kutuplayıcı açıları teorik elipsometrik parametrelere

$$P = - \frac{\Delta}{2} \mu \frac{\pi}{4} \quad (28)$$

$$A = \mu \Psi \quad (29)$$

şeklinde bağlıdır. Bu ifadeler kullanılarak öncelikle P ve A açıları yardımıyla Ψ ve Δ parametreleri belirlenir ve bu parametreler kullanılarak cam malzemenin kırılma indisi hesaplanabilir. Burada ışığın gelme açısı ve ışığın geldiği ortam olan havanın kırılma indisi önceden bilinen parametrelerdir.

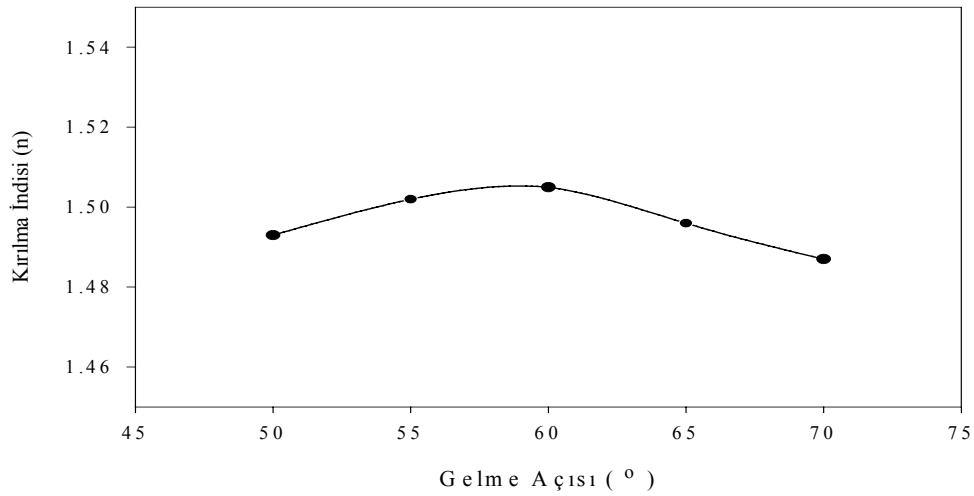
Sonuçlar ve Tartışma

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 çalışmada ince filmlerin optiksel özelliklerini belirlemede geniş kullanım alanı bulan ve polarimetrik bir yöntem olan elipsometri tekniği çalışılmıştır. Yapılan çalışmada S.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü araştırma laboratuvarında tasarlanıp gerçekleştirilen Elipsometri düzeneğini kontrol amacıyla herhangi bir cam malzeme için ölçümler alınmıştır. Seçilen cam malzeme yaklaşık olarak 1 mm kalınlığındadır. Bu cam şekil.3 de numune yerine konulmuştur. Ölçümlerde 25 mW gücünde 633 nm dalgaboyunda ışık veren bir Helyum-Neon gaz laseri ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. Ölçümler sırasında geciktirici levhanın hızlı optik ekseninin gelme düzlemiyle yaptığı açı 45 dereceye ayarlanmıştır. Çünkü geciktirici levhanın 45 dereceden farklı herhangi bir açısal yönelimi için elipsometrik ifadeler çok karmaşık hale gelmekte ve çözümü oldukça güçleştirmektedir. Değişik gelme açılarına karşılık ölçülen parametreler çizelge1.de verilmektedir. Elde edilen bu veriler bilgisayar ortamında değerlendirilerek cam malzemenin kırılma indisi hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Herhangi bir cam malzeme için değişik gelme açılarında ölçülen elipsometrik parametreler ve bu parametrelere karşılık gelen kırılma indisleri.

Gelme Açısı	P	A	n_R	n_i	n
50	21	17	1,398	0,524	1,493
55	76	85	1,494	0,163	1,502
60	155	83	1,498	0,161	1,505
65	210	165	1,469	0,271	1,496
70	66	155	1,321	0,674	1,487



Grafikte numuneye gönderilen ışığın gelme açısının kırılma indisine bağlı değişimi gösterilmiştir. Genel olarak kırılma indisi 1.5 civarında değere sahiptir. Camın kırılma indisinin söz konusu dalgaboyunda reel olduğu göz önüne alınarak cam için soğurma indisi $k=0$ kabul edilmiştir. Bulunan bu değer herhangi bir cam malzemenin görünür spektrumun geniş bir bölgesinde yaklaşık olarak $n = 1.5$ değerinde bir kırılma indisine sahip olduğu gözönüne alınırsa oldukça mantıklı bir sonuçtur. Elde edilen sonuçlardaki hassasiyet, tasarlanıp gerçekleştirilen bu düzenek yardımıyla üç fazlı model olarak gözönüne alınan ince film yapılarında kırılma indisinin belirlenmesine olanak sağlayacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- 1- Burtchousky, E.G. Ellipsometric Method for Investigation of the Optical Anizotropy of Thin Films: Theory and Calculations *Thin Solid Films* 307:192-199 (1997)
- 2- 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)
- 3- Chen, J.J., Un, J.S., 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)
- 4- 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)
- 5- Kavcar, N. İnce Filmlerde Optik Yöntemlere Kısa Bir Bakış C.Ü. Fen-Edebiyat Fak. Fen Bil. Der. 3 Sivas (1985)
- 6- Mc Gilp, J. Optical Characterization of Semiconductor Surfaces and Interfaces *Progress in Surface Science* 49:1 1-106 (1995)

- 7- Çelik, G. , Şafak, H. İnce Film Selenyumun Kırılma İndisinin ve Sönüm Katsayısının Elipsometrik Yöntemle Tayini *S.Ü. Fen-Edebiyat Fak. Fen Dergisi* 17 111-117 Konya (2000)
- 8- Dignam, J.M. Fourier Transform Polarization Spectroscopy Canada (1988)
- 9- 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)
- 10- 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)
- 11- 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)
- 12- Hoarmans, M.T., Bedeaux, D. Optical Properties of Thin Films up to Second Order in the Thickness *Thin Solid Films* 258 213-223 (1994)

