

ZnO ince filmlerin kalınlıkları ve optiksel sabitlerinin noktasal kısıtlanmasız minimizasyon algoritması ile belirlenmesi

Nilgün ERARSLAN¹ & Tayyar GÜNGÖR^{2*}

¹Akdeniz Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 07570 Antalya, Türkiye.

²Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 15030 Burdur, Türkiye.

(*sorumlu yazar e-mail: tgungor@mehmetakif.edu.tr)

Özet: Saydam alttaş üzerindeki bir ince filmin optik bant aralığı (E_g), soğurma katsayısı $\alpha(\lambda)$, kırma indisi $n(\lambda)$ ve film kalınlığı (t) gibi optik sabitlerini belirlemek için genellikle optik geçirgenlik ve/veya yansıma spektrumları kullanılır. İlgilenilen dalgaboyu aralığında film kalınlığı ve kırma indisi çarpımının izin verdiği sonlu sayıda girişim saçaklarının gözlemlendiği durumlarda spektrumun tamamının değerlendirilmesi yerine ekstremum noktalarından geçen zarf eğrilerinin değerlendirildiği zarf yöntemi çok tercih edilen bir yöntemdir. Bununla beraber yeterli sayıda girişim saçığının olmadığı veya saçak derinliğinin çok az olduğu durumlarda bu yöntem kullanılamaz. Bu durumda ölçülen ve öngörülen optik geçirgenlik ve/veya yansıma değerleri arasındaki farkı minimize eden başka yöntemler kullanılmalıdır. Noktasal Kısıtlanmasız Minimizasyon Algoritması (Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm, PUMA) adı verilen yöntem bunlardan biridir. Bu yöntem ile film kırma indisi n ve sönüm katsayısı κ ve film kalınlığı t spektrumun tamamının dikkate alınması ile hesaplanabilir. Bu çalışmada PUMA yönteminin geçerliliği, Kimyasal Püskürtme (KP) tekniği ile hazırlanan farklı kalınlıklardaki ZnO ince filmler üzerinde test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik geçirgenlik, optiksel sabitler, PUMA.

The determination of the thickness and optical constants of the ZnO crystalline thin film by using pointwise unconstrained minimization algorithm

Abstract: Optical constants such as the optical band gap (E_g) and absorption coefficient $\alpha(\lambda)$, film thickness (t) and film refractive index $n(\lambda)$ could be computed from transmittance and/or reflectance spectra for thin film on the transparent substrate. The envelope method considering the curve through the extreme points instead of entire spectrum is much preferred method when the spectrum contain finite interference fringes for the given wavelength range depending on the refractive index (n) and thickness (t) product. However, this method can not be used in the case of insufficient number of interference fringes or no fringes and for the interference fringes with too little depth. In this case, the other methods should be used to minimize the difference between the measured and the predicted optical transmittance and / or reflection values. Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm (PUMA) is the one of the methods. The refractive index (n) and extinction coefficient (κ) films and film thickness (t) can be calculated using this method by taking into account the entire spectrum. In this study, the validity of the PUMA method was tested on the ZnO thin films with different thicknesses prepared by spray pyrolysis.

Keywords: Optical transmittance, optical constants, PUMA

Giriş

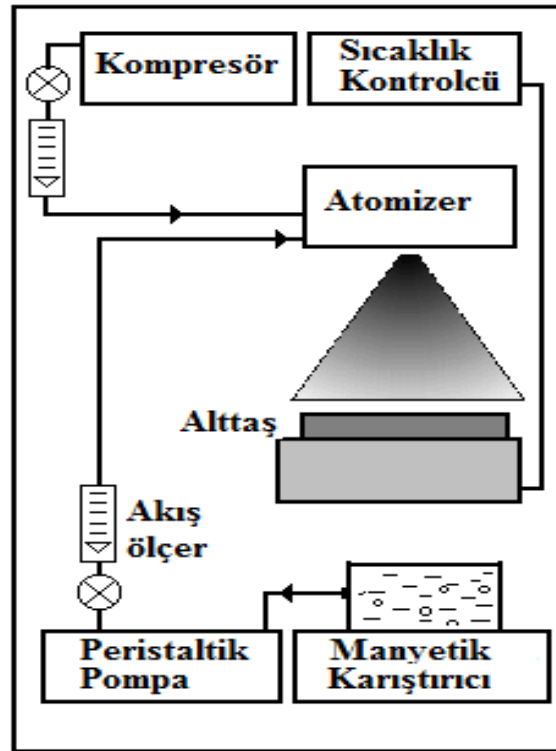
Saydam alttaş üzerinde bulunan bir ince film yüzeyinden geçen ve yansıyan ışık şiddetinin dalgaboyuna bağlı olarak ölçülmesi ile elde edilen optik geçirgenlik $T(\lambda)$ ve yansıma $R(\lambda)$ spektrumları, söz konusu ince filmin optik sabitlerinin dalgaboyu ile davranışlarının ve film kalınlığının belirlenmesinde kullanılmaları nedeni ile pek çok araştırmaya konu olmuştur (Manifacier et al., 1976; Godman, 1978; Swanepoel, 1983, 1985; Minkov, 1989, Güngör, 1998, 2001, 2004). Uygun film kalınlığı ve kırma indisi çarpım değerleri için spektrumun sonlu sayıda girişim saçakları içermesi durumunda spektrumun tamamının değerlendirilmesi yerine ekstremum (maksimum ve minimum) noktalarından geçen zarf eğrilerinin değerlendirildiği nispeten basit bir yöntem olan zarf yöntemi tercih edilir (Swanepoel, 1983). Benzer şekilde optik yansıma spektrumunun ekstremum noktalarından geçen eğrilerin lineer olmayan denklem sistemleri olarak düşünüldüğü ve çözümlerinin Newton-Raphson yöntemi ile elde edildiği çalışmalar da vardır (Minkov, 1989). Bununla beraber genellikle dalgaboyuna bağlı kırma indisi için bilinen ampirik değişimlerin (Cauchy, Sellmeier ve Forouhi-Bloomer vb.) kullanıldığı çok sayıda farklı teknikler içeren minimizasyon yöntemleri vardır (Minkov, 1989; Müllerová et al., 2003; Güngör, 2004). Fakat bu yöntemlerin kullanılabilmesi ve çözümün hızlı yakınsaması için kullanılacak değişkenlerde bazı kısıtlamalar gerekli olabilir. Bununla beraber kısıtlamaların olmadığı veya etkilerinin göz ardı edildiği yöntemler de vardır. Birgin et al., (1999) tarafından geliştirilen Nokta Tabanlı Kısıtlamasız Minimizasyon Algoritması (Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm, PUMA) bu yöntemlerden birisidir.

Bu çalışmada, ardışık ekstremum noktalar yerine belirli bir dalgaboyundan büyük her bir dalgaboyu ve bu dalgaboyuna karşılık gelen optik geçirgenlik değerlerinin kullanıldığı Noktasal Kısıtlamasız Minimizasyon Algoritması adı verilen yöntemin ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarına uygulanması incelenecektir. Yöntemin geçerliliği, ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarındaki girişim saçaklarının gözlemlendiği ve gözlenmediği her iki durum için de test edilmiştir.

Materyal ve Metod

Üzerinde optiksel ölçümlerin yapıldığı ZnO ince filmler mikroskop camları (Marienfeld) üzerine, ayrıntıları Güngör (2007) tarafından verilen Kimyasal Püskürtme sistemi (KP)

kullanılarak hazırlanmıştır. KP sistemi temel olarak, gaz akışını kontrol eden akış ölçer, kullanılacak olan çözelti, atomizer, alttaşın sıcaklığını kontrol eden sıcaklık kontrol biriminden oluşur (Şekil 1). Bu sistemde, atomizer adı verilen ve 100 kHz çalışma frekansına sahip titreştirici birim içerisinde 3:1 oranında metil alkol (CH_3OH) ve deiyonize su karışımında çözülen çinko asetat ($(\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, %99,9 Merck) başlangıç çözeltisi (toplam 150 ml) kullanılan püskürtme geometrisine bağlı olarak itici gaz (hava) yardımı ile alttaş üzerine gönderilir. Çözeltiye eklenen bir miktar asetik asit, çözeltinin berraklığını artırmakta ve hidroksil oluşumunu engellemektedir. Homojen bir çözelti elde etmek için başlangıç çözeltisi 1-2 saat manyetik karıştırıcı yardımı ile karıştırılır. Atomizer ile ısıtıcı arası uzaklık 12,5 cm olarak optimize edilmiştir. Isıtıcı üzerinde duran alttaşın sıcaklığı, sıcaklık kontrolcüsü ($\pm 5^\circ\text{C}$ 'lik hassasiyetle) ve ısı çifti (chromel-alumel) yardımıyla istenilen sıcaklık değerinde püskürtme süresince sabit tutulur. Bununla beraber, çözelti akış hızının büyük olduğu durumlarda çözeltinin alttaş yüzeyine ilk teması sırasında alttaş sıcaklığında kısa süreli olsa da bir dalgalanma gözlenebilir.



Şekil 1. 100 kHz osilatör frekansına sahip yukarıdan aşağıya düşey püskürtme geometrisine sahip KP sistemi blok şeması (Güngör, 2007).

350-425°C sıcaklık aralığında 25°C adımlarla, 4 farklı alttaş sıcaklık değerleri için 0,08M başlangıç çözeltisinin 1,2 ve 2,4 ml/dak akış hızlarında püskürtülmesi ile iki grup olarak toplam 8 adet ZnO ince film örnekleri hazırlanmıştır.

KP sisteminde hazırlanan ince filmlerin optik sabitlerinin (soğurma katsayısı, enerji bant aralığı, film kalınlığı, kırılma indisi) belirlenmesinde kullanılacak olan optik geçirgenlik spektrumları 190-900 nm dalgaboyu aralığında CARRY-100 spektrofotometresi kullanılarak elde edilmiştir. ZnO ince filmlerin yapısal özellikleri RIGAKU DMax-2200 (CuK_α ($\lambda=1,54059 \text{ \AA}$)) difraktometresi ile elde edilen x-ışını kırınım desenleri ve ICDD 36-1451 referansı kullanılarak incelenmiştir.

Noktasal Kısıtlamasız Minimizasyon Algoritması

Saydam alttaş üzerinde düzgün kalınlığa sahip bir ince film üzerine dik olarak gelen ışık ışını için optiksel süreç Şekil 2’de gösterilmiştir. Optik geçirgenlik T , filmin kalınlığı (t), gelen ışığın dalgaboyu (λ), filmin biriktirildiği alttaşın kırma indisi $s(\lambda)$, filmin kırma indisi $n(\lambda)$ ve optik sönüm katsayısına $\kappa(\lambda)$ bağlı olarak

$$T(n(\lambda), t, s(\lambda), \kappa(\lambda), \lambda) = \frac{Ax}{(B - Cx - Dx^2)} \quad (1)$$

$$A = 16s(n^2 + \kappa^2) \quad (2)$$

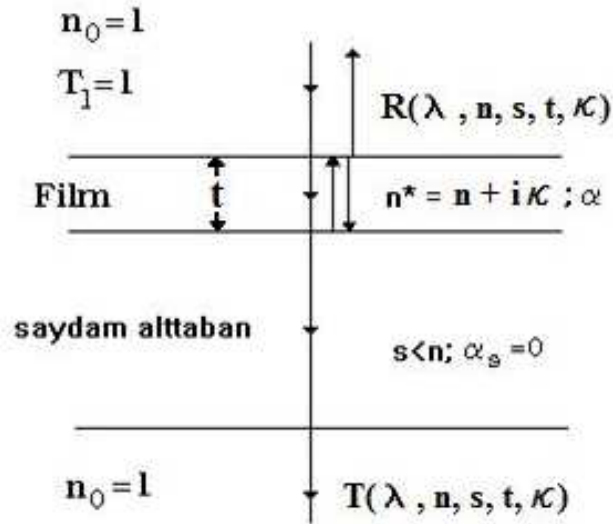
$$B = [(n+1)^2 + \kappa^2][(n+1)(n+s^2) + \kappa^2] \quad (3)$$

$$C = [(n^2 - 1 + \kappa^2)(n^2 - s^2 + \kappa^2) - 2\kappa^2(s^2 + 1)]2 \cos \varphi - \kappa[2(n^2 - s^2 + \kappa^2)(s^2 + 1)(n^2 - 1 + \kappa^2)]2 \sin \varphi \quad (4)$$

$$D = [(n-1)^2 + \kappa^2][(n-1)(n-s^2) + \kappa^2] \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{4\pi nt}{\lambda}, \quad x = \exp(-\alpha t), \quad \alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda} \quad (6)$$

ifade edilir.



Şekil 2. Sonlu kalınlıktaki saydam alttaş üzerindeki film yüzeyine gelen ışık için optiksel süreç.

Problem, Eş. (1) ile verilen teorik optik geçirgenlik değeri ile deneysel olarak ölçülen geçirgenlik değeri arasındaki farkı her bir dalgaboyu değeri için minimum yapan optik sabitlerin belirlenmesidir. Optik geçirgenlik spektrumu esas olarak $\lambda_{\min} \leq \lambda_i < \lambda_{i+1} \leq \lambda_{\max}$ şartlarını sağlayan N ($i=1,2,\dots,N$) adet ayırık dalgaboyu için ölçülen geçirgenlik değerlerinden oluşur ($\lambda_i, T^{\text{ölçülen}}(\lambda_i)$). Bununla beraber, bu N adet denklemin çözümü olan $t, n(\lambda), \kappa(\lambda)$ değerlerini belirlemek oldukça zordur. Bu zorluktan kurtulmak için bazı yaklaşıklıklar ve kabuller ile bağımsız değişken sayısı azaltılabilir. İlk olarak, alttaş kırma indisi sabit olarak alınabilir veya alttaş kırma indisinin dalgaboyu ile değişimi hesaplamalara katılabilir. İkinci adım olarak, film kalınlığı için sonlu ve belirli bir film kalınlık değeri ele alınırsa ölçülen ve teorik optik geçirgenlik değerleri arasındaki farkı minimum yapan çözümler iki boyutlu $n(\lambda)$ ve $\kappa(\lambda)$ uzayında aranmalıdır. Son olarak, $n(\lambda)$ ve $\kappa(\lambda)$ uzayının bazı fiziksel sınır şartları kullanılarak kısıtlanması çözümün daha hızlı olmasını sağlayabilir. Örnek olarak temel soğurma kenarı bölgesinde geçerli olan 4 adet sınırlama aşağıda verilmiştir;

1. $n(\lambda) \geq 1, \quad \kappa(\lambda) \geq 0, \quad \forall \lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$,
2. $n(\lambda)$ ve $\kappa(\lambda)$ dalgaboyu ile azalan fonksiyonlar olmalı,
3. $n(\lambda)$ konveks olmalıdır,
4. λ_{\min} ve λ_{\max} aralığında bir eşik dalgaboyu (λ_{inf}) değeri için $\kappa(\lambda)$

$$\lambda \geq \lambda_{\text{inf}} \text{ ise konveks,}$$

$$\lambda < \lambda_{\text{inf}} \text{ ise konkav olmalıdır.}$$

Bu sınırlamalara ek olarak n ve κ dalgaboyuna bağlı sürekli fonksiyonlar olmaları gerektiği için sınır şartları, bu değişkenlerin kendilerinin ve türevlerinin λ_{min} , λ_{inf} ve λ_{mak} gibi özel dalgaboyu değerlerini dikkate alarak yeniden düzenlenebilir;

$$n'(\lambda_{mak}) \leq 0, \quad \kappa'(\lambda_{mak}) \leq 0 \quad \text{ve} \quad \kappa'(\lambda_{min}) \leq 0 \quad (7)$$

$$n(\lambda_{mak}) \geq 1, \quad \kappa(\lambda_{mak}) \geq 0 \quad (8)$$

$$n'(\lambda_{mak}) \leq 0, \quad \kappa'(\lambda_{mak}) \leq 0 \quad (9)$$

$$n''(\lambda) \geq 0, \quad \forall \lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{mak}] \quad (10)$$

$$\kappa''(\lambda) \geq 0, \quad \forall \lambda \in [\lambda_{inf}, \lambda_{max}] \quad (11)$$

$$\kappa''(\lambda) \leq 0, \quad \forall \lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{inf}] \quad \text{için} \quad (12)$$

$$\kappa'(\lambda_{min}) \leq 0 \quad (13)$$

Ayrıca, λ_{min} ve λ_{mak} dalgaboyu aralığı içinde tanımlanan amaç fonksiyonunda

$$\text{Minimize} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{mak}} |T(\lambda, s(\lambda), t, n(\lambda), \kappa(\lambda)) - T^{\text{ölçülen}}(\lambda)|^2 d\lambda \quad (14)$$

$n(\lambda)$, $\kappa(\lambda)$ ve bunların λ_{mak} değerinde birinci ve ikinci türevleri ile kareli terimleri yardımcı değişken olarak tanımlanır ve κ üzerine yapılan sınırlamanın problemin çözümü için etkili olmayacağı varsayımı dikkate alınabilir. Ayrıntılar Birgin et al., (1999) tarafından açıklanmıştır. Bu durumda Eş. (14) ile verilen amaç fonksiyonu sınırlamasız minimizasyon problemi olarak düşünülebilir.

Yöntem ilk olarak öngörülen film kalınlığı için ölçülen optik geçirgenlik değerlerini kullanarak, $\lambda > \lambda_{inf}$ şartını sağlayan dalgaboyu (λ_{bound}) değerleri ile

$$\sum_{\lambda_i \geq \lambda_{bound}} [T(\lambda_i, s(\lambda_i), t, n_i, \kappa_i)]^2$$

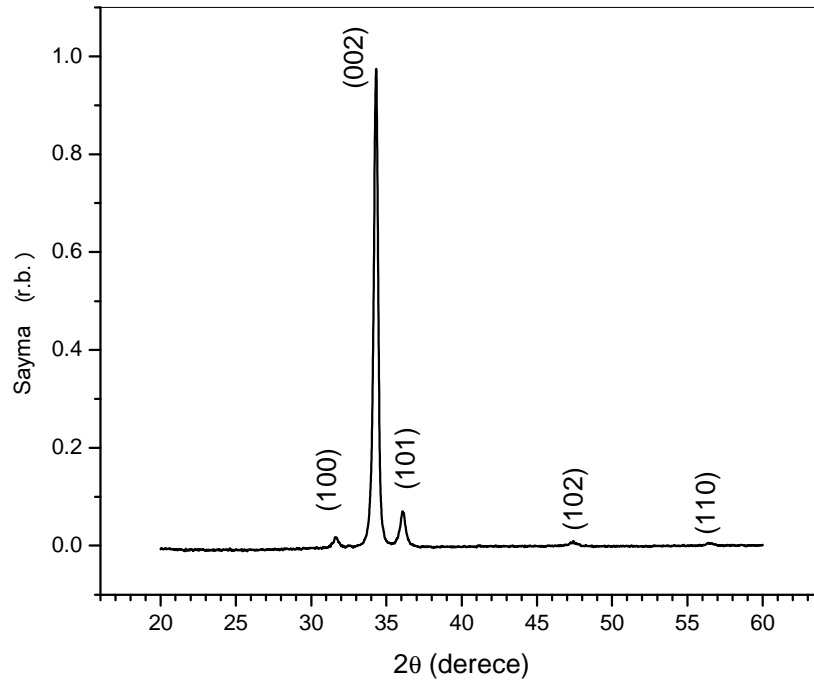
tanımlanan amaç fonksiyonunu minimize eder. İkinci adım olarak film kalınlığı sabit kabul edilerek yeniden düzenlenen amaç fonksiyonunu,

$$\sum_{i=1}^N [T(\lambda_i, s(\lambda_i), t, n_i, \kappa_i) - T_i^{\text{ölçülen}}]^2$$

farklı λ_{inf} dalgaboyu değerleri için n , κ ve bunlarla ilişkili değişkenler uygun değerleri ile minimize edilir.

Bulgular

KP sisteminde elde edilen ZnO ince filmlerin yapısal özellikleri x-ışını kırınım desenleri ile incelenmiştir. Şekil 3’de örnek grubundan seçilen bir örneğe ait (2.4 ml/dak akış hızı, 0,08 M, $T_s=350^\circ\text{C}$) x-ışını kırınım deseni ve bu desen yardımı ile hesaplanan yapısal sabitler Tablo 1’de verilmiştir. Genel olarak bütün örneklerde (002) tercihli yönelme gözlenmiş olup alttaş sıcaklığına ve akış hızına bağlı olarak bu pikin şiddetinde bir değişiklik gözlenmiştir. İnce filmlerde sinyal/gürültü oranı azaldığı için (100), (002) ve (101) piklerin dışındaki piklerin şiddetleri oldukça azalmıştır.

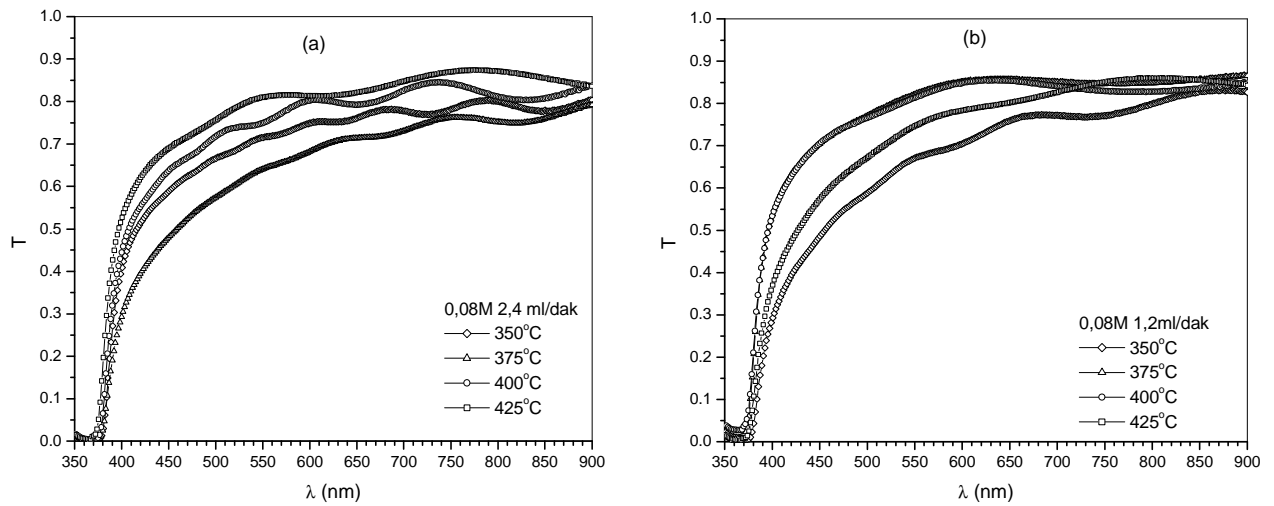


Şekil 3. 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C alttaş sıcaklığına sahip örneğin normalize x-ışını kırınım deseni.

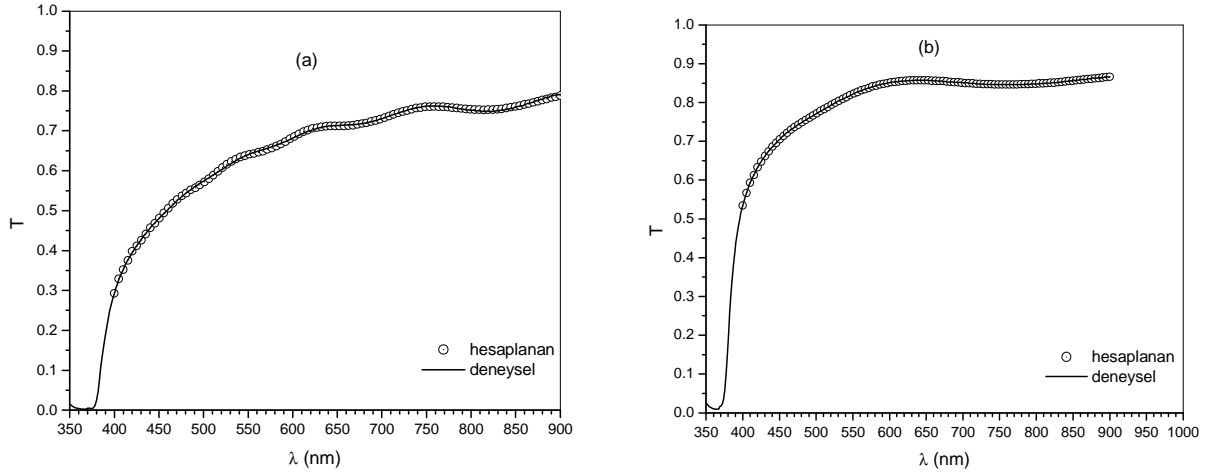
Tablo 1. 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C alttaş sıcaklığına sahip örneğin x-ışını kırınım deseninden elde edilen parametreler.

(hkl)	2 θ	d (Å)	Şiddet
(100)	31.681	2.8143	1.8961
(002)	34.402	2.6033	100
(101)	36.134	2.4760	7.2698
(102)	47.496	1.9111	0.8142
(110)	56.546	1.6248	0.6846

2,4ml/dak ve 1,2ml/dak akış hızlarında 0,08 molar püskürtme çözeltisi kullanılarak KP sisteminde ile hazırlanan ZnO ince filmlerin Carry-100 spektrofotometresi ile elde edilen optik geçirgenlik spektrumları toplu olarak gösterilmiştir (Şekil 4). Genel olarak düşük akış hızı değerlerine sahip örneklerde (Şekil 4-b) girişim saçaklarının genişliği artmaktadır. Saçak derinliğinin de oldukça az olduğu gözlenmektedir. Yüksek akış hızı ile hazırlanan örneklerin (Şekil 4-a) saçak derinlikleri az olmasına rağmen daha kalın oldukları gözlenmiştir.



Şekil 4. 2,4ml/dak (a) ve 1,2ml/dak (b) akış hızına sahip 0,08 M örneklerin alttaş sıcaklığına bağlı optik geçirgenlik spektrumları.



Şekil 5. 375°C alttaş sıcaklığında 2,4ml/dak (a) ve 1,2ml/dak (b) akış hızına sahip 0,08 M örneklerin deneysel ve hesaplanan optik geçirgenlik spektrumları.

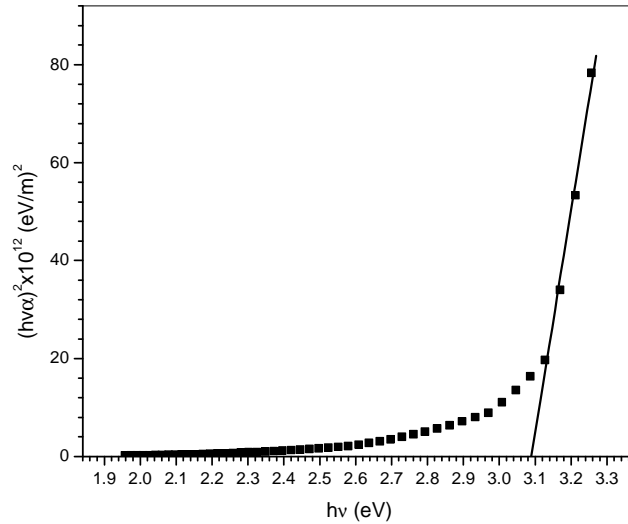
İlk olarak alttaş kırma indisinin dalgaboyu ile değişimi, kaynak bilgisayar programı (Birgin et al., (1999) tarafından C++ programlama dilinde kaynak kod olarak hazırlanmış olup son yıllarda yeniden gözden geçirilerek (farklı alttaşlar eklenmiş olarak) güncellenmiştir) içine uygun şekilde formülize edilerek yerleştirildi. Carry-100 spektrofotometresi ile elde edilen optik geçirgenlik spektrumu, program ile değerlendirildi ve kabul edilebilir hata değerlerine ($\approx 10^{-4}$) ulaşmaya kadar film kalınlığındaki belirsizlik azaltıldı, sonrasında ardışık tekrarlar ile teorik spektrumlar elde edildi. Farklı akış hızlarında elde edilen 0,08 M örneğin deneysel ve hesaplanan optik geçirgenlik spektrumları Şekil 5’de gösterilmiştir. ZnO ince filmlerin hazırlanma parametreleri ve PUMA yöntemi ile elde edilen optik sabitleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. ZnO ince filmlerin hazırlanma parametreleri ve PUMA ile elde edilen optik sabitler. T_s alttaş sıcaklığı, Ah çözelti akış hızı, T_{auc} eşitliği yardımı ile bulunan optik bant aralığı E_{g1} ve λ_c kritik dalgaboyu yardımı ile belirlenen optik bant aralığı E_{g2} .

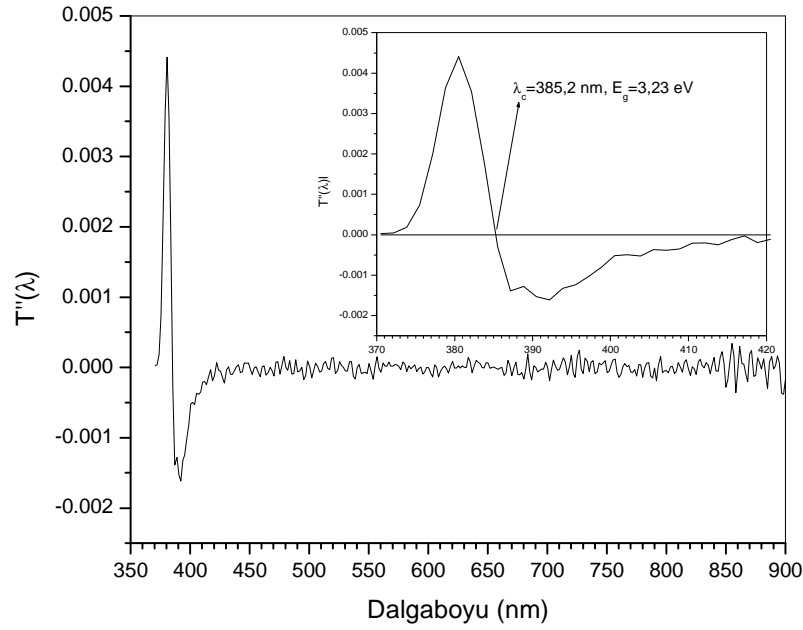
T_s (°C)	Ah (ml/dak)	$n_{\lambda=632nm}$	t (nm)	E_{g1} (eV)	λ_c (nm)	E_{g2} (eV)
350	1,2	1,674	795	3,09	383,4	3,24
375	1,2	1,670	365	3,16	380,1	3,27
400	1,2	1,742	350	3,18	381,6	3,25
425	1,2	1,618	710	3,16	380,1	3,27
350	2,4	1,620	1455	3,08	385,2	3,22
375	2,4	1,644	1130	3,06	385,2	3,22
400	2,4	1,697	870	3,11	383,4	3,24
425	2,4	1,656	675	3,19	380,1	3,27

Swanepoel tarafından geliştirilen envelope (zarf) yönteminde yeterli sayıda ve yeterli derinlikte girişim saçaklarının bulunması önemlidir. Ek olarak, ardışık ekstremumlardan geçen zarf eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan ekstremum noktalarının yeterince hassas olarak belirlenmesi de önemlidir (Mc Clain et al., 1991). Oysa burada kullanılan PUMA yöntemi, sonlu sayıda ve yeterli derinlikte girişim saçaklarının bulunmadığı hatta girişim saçaklarının hiç bulunmadığı durumlarda da kullanılabilir (Birgin et al., 1999). Bu yöntem ile elde edilen optik sabitler Tablo 2’de verilmiştir.

Film kalınlığının belirlenmesinden sonra, ZnO filmlerin optik bant aralıkları (E_g), Tauc eşitliği yardımı ile belirlenmiştir (Tauc et al., 1965). Şekil 6’da 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C altta sıcaklığına sahip örneğin $(\alpha hv)^2 - hv$ değişimi gösterilmiştir. Bununla beraber optik geçirgenlik spektrumunun dalgaboyuna göre ikinci türevi yardımı ile de optik bant aralığı belirlenebilir (Ohring, 1991). Bu yöntemde optik bant aralığı eV biriminde $E_g = 1245,1/\lambda_c(\text{nm})$ eşitliği ile hesaplanabilir. Burada λ_c , optik soğurma kenarındaki dönüm noktasına karşı gelen dalgaboyudur. Şekil 7’de 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C altta sıcaklığına sahip örnek için $T''(\lambda)$ değişimi ve λ_c değerinin ayrıntılı olarak belirlendiği ek grafik gösterilmiştir. Bu yöntem SnO₂ ince filmler için kullanılmıştır (Dolbec et al., 2002). Her iki yöntem ile belirlen E_g değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 6. 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C altta sıcaklığına sahip örneğin $(\alpha hv)^2 - hv$ değişimi.



Şekil 7. 2,4 ml/dak akış hızına sahip 0,08 M örnek grubundan 350°C alttaş sıcaklığına sahip örneğin $T''(\lambda)$ değişimi.

Sonuçlar

Bu çalışmada, KP sisteminde hazırlanan filmlerin x-ışını kırınım desenleri incelendiğinde (002) tercihli yönelime sahip ZnO ince filmlerin elde edildiği görülmüştür. Farklı kalınlıklarda ince film elde etmek için sadece püskürtme süresi, başka bir deyiş ile biriktirme süresinin değil, başlangıç çözeltisinin akış hızı ve alttaş sıcaklığının da etkin olduğu gözlenmiştir. Başlangıç çözeltisinin akış hızının fazla olması daha kalın filmlerin, akış hızının düşük olması ise daha ince film elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla beraber alttaş sıcaklığı da dikkate alınmalıdır. Bu şekilde elde edilen ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarındaki girişim saçaklarının gözlendiği ve gözlenemediği spektrumlarının PUMA yöntemi ile değerlendirilmesi ile söz konusu ZnO ince filmlerin optik sabitleri belirlenmiştir. Söz konusu yöntem için optik geçirgenlik spektrumunda gözlenmesi muhtemel (uygun n^*t değeri için) girişim saçaklarının sayısının ve genliklerinin önemli olmadığı da gözlenmiştir.

Teşekkürler

Yazarlar olarak, Akdeniz Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümüne ve Arş. Gör. Edip BAYRAM'a, x-ışını kırınım desenlerinin elde edilmesindeki katkılarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Filiz ERCAN'a ve katkılarından dolayı, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (105T003 AY/401 16797), Hacettepe Üniversitesi'ne (006030216 ve G01-011) teşekkür ederiz. Bu çalışmada kullanılan C++ bilgisayar programlama dilinde yazılan kaynak programa <http://www.ime.usp.br/~egbirgin/puma> adresinden ulaşılabilir.

Kaynaklar

- Birgin, E. G., Chambouleyron, I., & Martinez J. M., (1999) Estimation of optical constants of thin films using unconstrained optimization, *Journal of Computational Physics*, 151, 862-888.
- Dolbec, R., El Khakani, M. A., Serventi, A. M., Rudeau, M. T., & Saint-Jacques R.G. (2002). Microstructure and physical properties of nanostructured tin oxide thin films grown by means of pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 419, 230-236.
- Goodman A. M., (1978). Optical Interference method for the approximate determination of refractive index and thickness of a transparent layer, *Applied Physics*, 17, 17.
- Güngör T., (1998). Determination of optical constant and thickness for a-SiNx:H thin film, *Journal of Research in Physics*, 27, No.1, 1-9.
- Güngör T., (2001). Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (yayımlanmamış doktora tezi).
- Güngör T., & Saka B. (2004). Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum using a genetic algorithm, *Thin Solid Films*, 467, 319-325.
- Güngör T., (2007). Saydam iletken oksit ince filmlerin üretilmesi ve elektrooptiksel karakterizasyonu, Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi, Proje No: 030260216.
- Manificier, J. C., Gasiot, J., & Fillard, J. P. (1976). A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing thin film, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 9., 1002.
- Minkov, D. A., (1989). Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 22, 1157-1161.
- Minkov, D. A., (1989). Method for determining the optical constants of a thin film on a transparent substrate, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 22, 199-205.

- Mc Clain, M., Feldman, A., Kahaner, D. & Ying, X., (1991). An algorithm and computer program for the calculation of envelope curves, *Computers in Physics*, 5, No. 145.
- Müllerová, J., Jurečka, S., & Kučerová, A. (2003). Extraction of optical parameters of thin films from spectral measurements for design and optical performance of multilayer structures, *Acta Physica Slovaca*, 53, No. 2, 111 – 119.
- Ohring M (1991). *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press, New York, NY.
- Swanepoel, R., (1985). Determining refractive index and thickness of thin films from wavelength measurements only., *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2, No. 8, 1339-1343.
- Swanepoel R. (1983). Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *J. Phys., E. Sci. Instrum.*, 16, 1214-1222.
- Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A., (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *Phys.Stat. Sol.* 15, 627.