

Titanyum dioksit ve çinko oksitten yansıtımayıcı filtre üretimi

Durşen SAYGIN HINCZEWSKI*, Fatma Z. TEPEHAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Sol-jel döndürerek kaplama yöntemiyle hazırlanmış TiO_2 (titanyum dioksit) ve ZnO (çinko oksit) ince filmleri kullanılarak görünür bölgenin belli bir dalgaboyu aralığı için çok katmanlı yansıtımayıcı filtre elde edilmiştir. Filtre tasarımı ZnO/TiO_2 /taşıyıcı/ TiO_2/ZnO olarak gerçekleştirilmiş ve taşıyıcı olarak Corning 2947 camı kullanılmıştır. Filtredeki filmlerin optik özellikleri belirlenerek tek-katman film sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Başka bir karşılaştırma, tek-katman filmler ile filtrenin yüzey pürüzlülükleri arasında yapılmıştır. Tek-katman ZnO filmi ve filtre içindeki ZnO filminin optik band aralığı değeri neredeyse aynı iken, TiO_2 filminin optik band aralığı filtrede tek-katman TiO_2 filmine göre oldukça yüksek çıkmıştır. Filtre içinde hem ZnO hem de TiO_2 filmlerinin kalınlıkları tek-katman filmlere göre daha ince bulunmuştur. Ayrıca ZnO 'te TiO_2 'e göre daha fazla incelme gözlemlenmiştir. Kırma indisi değerleri 550 nm dalgaboyunda TiO_2 için tek-katmanda ve filtrede neredeyse aynı bulunmuştur, aynı durum ZnO için de geçerlidir. Tek-katman TiO_2 ve ZnO filmlerinin yüzeyleri oldukça pürüzsüzken filtrenin yüzeyinin daha pürüzlü olduğu ortaya çıkarılmıştır; yani ZnO filmi cam yerine TiO_2 üstüne kaplandığında yüzeyi daha pürüzlü olmaktadır. Elde edilen filtrede, yansıtmanın minimumu 650 nm dalgaboyunda %0.808 değeri ile meydana gelmekte, ayrıca yansıtma, 635-665 nm dalgaboyu aralığı için %1'den, 585-720 nm için %4'den az çıkmaktadır. Sonuçta, sol-jel yöntemi kullanılarak elde edilen ZnO filminin, TiO_2 filmiyle beraber yansıtımayıcı filtrelerde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZnO , TiO_2 , sol-jel, döndürerek kaplama, yansıtımayıcı filtre.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Durşen SAYGIN HINCZEWSKI. saygin@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 32 11.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Optik filtre uygulamaları için katmanlı ve katkılı metal oksit filmlerin oluşturulması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.12.2008 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 14.01.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The production of an antireflective filter from titanium dioxide and zinc oxide

Extended abstract

Antireflective filters are mostly used to increase the efficiency of solar cells. They vary from each other in their method of coating, the filter design, the materials that are used, and where their minimum occurs.

In the present work, we coated TiO_2 (titanium dioxide) and ZnO (zinc oxide) thin films through the sol-gel spin coating method to obtain an antireflective filter. First, single films were coated, producing a substrate/film system. The transmittance and reflectance of this system were obtained in the UV-visible region. The thicknesses, refractive indices and extinction coefficients of the films were determined. By choosing the appropriate film thicknesses and refractive indices needed for an antireflective filter in the desired wavelength region, the single films were combined to build filters with a ZnO/ TiO_2 /substrate/ TiO_2 /ZnO structure.

Then the optical properties of the individual films in the multilayer stack were extracted and were compared to the single film results. The surface roughness of the single films was also compared to the filter's surface roughness.

The experimental procedure involves sol preparation, coating of the films, and characterization methods. The sol-gel coating method was chosen for a variety of reasons: it is cheap to fabricate, there is minimal loss of material during coating, it is suitable for mass production, homogenous films can be obtained, and by changing the amount of the chemical components and coating parameters, one can get a desired film thickness.

For the TiO_2 sol, ethyl alcohol, titanium (IV) butoxide and acetic acid were used. 2-propanol, Zinc acetate dehydrate, diethanolamine and distilled water were used to prepare the ZnO sol.

Both the single layer films and the filter were coated on Corning 2947 as a substrate. The films in the filter were coated at different rotation speeds and number of layers.

All the sub layers were preheated at the same temperature with the same duration time, which was

1 min at 250°C. Finally the stack firing method was applied to the filter for 15 min at 450°C.

As for characterization methods, the transmittance and reflectance of the single films and the filter were obtained through a UV-visible spectrophotometer. The thicknesses, refractive indices and extinction coefficients were determined by fitting to a modified Tauc-Lorentz model for the ZnO films and a Tauc-Lorentz model for the TiO_2 films. The surface roughness of the single films and the filter was determined by atomic force microscopy.

The characterization of the films and filter lead to the following results. The optical bandgap value of the TiO_2 film was found to be 3.37 eV in the single layer and 3.53 eV in the stack. ZnO had a bandgap value of 3.25 eV in the single layer which shifted to 3.29 eV in the stack. Thus, the bandgap value of ZnO stays almost the same while the one of TiO_2 increases by a substantial amount. The thickness value of TiO_2 in the single layer was 168 nm and dropped to 157 nm in the stack. The ZnO film had a thickness of 111 nm for the single layer but 81 nm for the one in the stack. As a percentage of the single layer thickness, the reduction in size was larger for ZnO than TiO_2 . The refractive index of TiO_2 at $\lambda=550$ nm in the single layer was 2.04 and 2.02 in the stack. The ZnO layer had a refractive index of 1.40 in the single layer and 1.38 in the stack. This shows that for both of the films, the indices in the stack and single layers stay almost the same, which allows the single layer properties to be useful in predicting the behavior of the stack.

The root mean square roughness values for the single layer TiO_2 and ZnO films are 0.5 and 5.2 nm, respectively. When the ZnO film is fabricated in the filter, its roughness value increased to 9.2 nm, which means that if the ZnO film is coated onto TiO_2 instead of glass, its surface becomes slightly rougher.

The filter had a minimum at $\lambda=650$ nm with 0.808% reflection. The reflection for the wavelength range 635-665 nm was less than 1% and for 585-720 nm it was less than 4%.

To summarize, it is shown here that sol-gel-made ZnO films can be used in an antireflective filter incorporating a TiO_2 layer.

Keywords: ZnO, TiO_2 , sol-gel, spin coating, antireflective filter.

Giriş

Yansıtmaııcı filtreler, güneş pilleri gibi ışıktan yararlanılan tüm devre elemanlarında, verimi arttırdıkları için kullanılırlar. Bu filtreler birbirlerinden merkezi dalgaboyu ve genişliğı, kaplanma şekilleri, bünyelerindeki malzemeler veya tasarımları ile farklılık gösterebilirler (Chen, 2001).

Bu çalışmada, camın simetrik olarak TiO_2 , sonra da TiO_2 üstüne ZnO filmleri kaplanmasıyla, görünür bölgenin belirli bir dalgaboyu aralığı için yansıtmaııcı filtre elde edilmiştir. Yansıtmaııcı filtredeki filmlerin kalınlıkları ve optik parametreleri bulunmuş, filtrenin yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Ayrıca aynı parametreler, ayrı ayrı camın üstüne kaplanan TiO_2 ve ZnO filmleri (tek-katman) için de elde edilmiştir.

Kaplama yöntemi olarak sol-jel seçilmiştir. Sol-jel yönteminin seçilmesinin sebebi yöntemin ucuz, kolay uygulanabilir, fabrikada seri üretime uygun olması ve gerektiğinde oda şartlarında yapılabiliyor olmasındandır. Ayrıca kaplama parametreleri ve kimyasalların rahatça değiştirilip istenilen kalınlık ve indiste film elde edilebilmesi de bu çalışmada tercih sebebi olmuştur.

Çalışmada TiO_2 ve ZnO filmlerinin seçilmesinin sebebi, yansıtmaııcı hazırlama koşullarıdır. İki katmanlı bir yansıtmaııcı sistemde kalınlık ve indis koşulu basitçe şöyle özetlenebilir: Kalınlık koşulu, d , filmin kalınlığı λ , gelen ışının dalgaboyu ve n , filmin kırma indisi olmak üzere $d = \lambda / 4n$ şeklinde verilir. İndis koşulu ise $n_2 / n_1 = \sqrt{n_s / n_0}$ olarak yazılır. Burada n_1 ve n_2 filtrede kullanılan filmlerin, n_0 dış ortamın ve n_s taşıyıcının kırma indisidir. Bu koşullar normal geliş, malzemelerde absorplama olmadığı durum ve tek taraflı yansıtmaııcılar için çıkartılmıştır.

ZnO filmleri seçiminin diğere bir nedeni ise toksik olmamalarıdır. Bu filmler ayrıca görünür bölgede yüksek geçirgenliğe sahiptirler, yüksek band aralıkları ve düşük iletkenlikleri vardır, ayrıca hammaddelerinin bulunması kolay ve

ucuzdur. Bu özellikler bu filmle çalışmayı teşvik etmektedir: gaz algılayıcısı (Ferro vd., 2008) ve güneş pilleri için iletken tabaka (Beyer vd., 2007) olarak araştırılmışlardır. Fotolüminesans özellikleri de araştırma konusu olarak ilgi çekmiştir (Sagar vd., 2007).

İnce film araştırmalarında öne çıkan diğere metal oksit ise TiO_2 'dir. Filtredeki diğere film TiO_2 olarak seçilmiştir çünkü yüksek kırma indisine sahiptir. TiO_2 görünür bölgede geçirendir, yüksek kırma indisi, dielektrik sabiti ve band aralıkları ile fotovoltaiik hücrelerde (Yang vd., 2007), elektrokromik aygıtlarda (Verma vd., 2007), yansıtmaııcı kaplamalarda (Saygın Hinczewski vd., 2005) ve gaz algılayıcılarında (Karunagaran vd., 2007) kullanılabilirler. Bunların dışında, TiO_2 filmleri dayanıklıdır ve üretim maliyeti ucuzdur.

ZnO filmlerinin TiO_2 üstüne kaplandığı çalışmalar da vardır. ZnO/TiO_2 çok-katmanlı sisteminin UV şiddetinin tek-katman ZnO 'in fotolüminesansıyla kıyaslandığında daha fazla olduğu bulunmuştur (Shi vd., 2007). Ayrıca, TiO_2 elektrodları ZnO ile kaplandığı zaman boya-sentezli güneş pillerinin performansında gelişme olduğu gözlemlenmiştir (Kim vd., 2007).

Deneyisel yöntemler

Sol hazırlanması

Tüm çalışmada taşıyıcı olarak Corning 2947 kullanılmıştır. Camlar, laboratuvar deterjanıyla temizlenmişlerdir. Sonra suyla durulanmış ve 15 dakikalığına ultrasonik banyoya konulmuşlardır. TiO_2 solü hazırlamak için 15 ml etil alkol (EtOH) [%99.9, Merck], 1.2 ml titanyum (IV) butoksit ($Ti[O(CH_2)_3 CH_3]_4$, TIVBT) [%97, Aldrich] ve 0.18 ml asetik asit (CH_3COOH) [%99.9, Merck] ile oda sıcaklığında 30 dk karıştırılmıştır. Bu sole 10 ml EtOH eklenip bir saat daha karıştırılmıştır. ZnO solü için, ilk önce 10 ml 2-propanol (C_3H_8O) [%99, Aldrich], 0.9 g çinko asetat dehidrat ($(CH_3CO_2)_2Zn \cdot 2H_2O$) [%98, Aldrich] ve dietanolamin ($(HOCH_2CH_2)_2NH$, DEA) [%99, Aldrich] $60^\circ C$ 'de 10 dk karıştırılmıştır, sonradan bu sole saf su da eklenmiştir.

Film kaplanması

ZnO/TiO₂/taşıyıcı/TiO₂/ZnO tasarımı ile filtre oluşturmak için, önce TiO₂ katmanı, taşıyıcının her iki tarafına TiO₂ solü kullanılarak 1500 devir/dk hızında kaplanmıştır. Bu kaplama ve bu çalışmadaki tüm kaplamalar için döndürme süresi 10 s'dir. Katman 1 dk'lığına 250°C'de (Carbolite, CWF 1100) ön-ısıtma işlemi tutulmuştur. Kaplama ve ön-ısıtma işlemi mekanizması altı kere tekrar edilmiş, ve elde edilen filme TiO₂ filmi denilmiştir. Sonra, ZnO solü kullanılarak, dört defa ZnO katmanı TiO₂ filminin üstüne simetrik olarak 2500 devir/dk ile kaplanmıştır. ZnO filmi olarak adlandırılacak filmin eldesi için her katman TiO₂ katmanları gibi ön-ısıtma işlemi tutulmuştur. Filtreye 450°C'de 15 dk boyunca son ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Tablo 1'de tek-katman filmlerin kaplama parametreleri listelenmiştir. Çok-katmanlı filtreye ek olarak ZnO ve TiO₂ filmlerinin tek-katmanları da kıyaslama için hazırlanmıştır. Yani, taşıyıcı/ZnO ve taşıyıcı/TiO₂ olacak şekilde taşıyıcının sadece bir yüzü ilgili filmle kaplanmıştır. Tek-katman film için olan kaplama solü, kaplama hızı ile süresi ve son ısıtma işlemi filterede karşılık geldiği filmle eşdeğerdir.

Tablo 1. Tek-katman filmlerin kaplama parametreleri

Parametre	Film	
	TiO ₂	ZnO
Kaplama hızı (devir/dk)	1500	2500
Kaplama süresi (s)	10	10
Ön-ısıtma işlem sıcaklığı (°C)	250	250
Ön-ısıtma işlem süresi (dk)	1	1
Alt katman sayısı	6	4
Son ısıtma işlem sıcaklığı (°C)	450	450
Son ısıtma işlem süresi (dk)	15	15

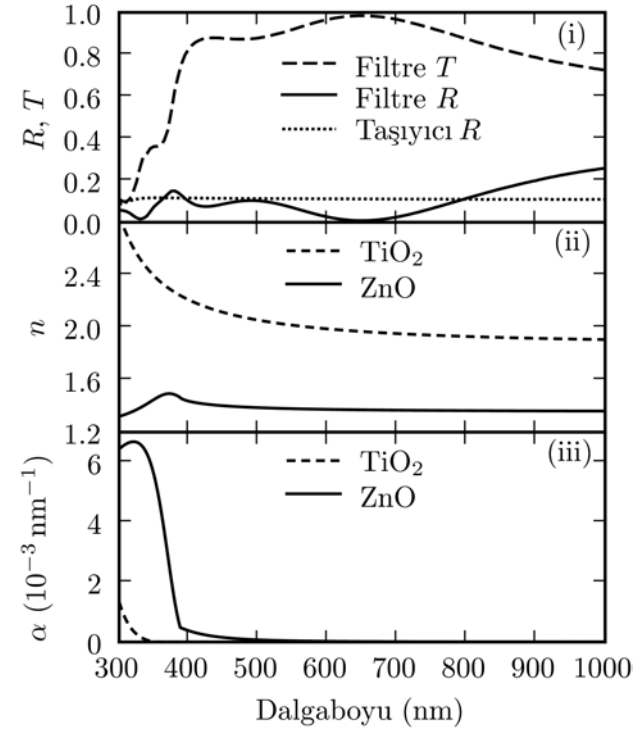
Karakterizasyon yöntemleri

Film-taşıyıcı sisteminin geçirgenlik ve yansıtması NKD Spektrofotometresi (Aquila Instruments) tarafından 300-1000 nm dalgaboyu bölgesi için 30° geliş açısıyla s-polarizasyonda elde edilmiştir. Filtrenin ve tek-katmanların yüzey pürüzlülükleri değme modunda çalışan bir atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (SPM-

9500J3, Shimadzu) ile karakterize edilmiştir. Optik parametrelerin ve kalınlıkların bulunmasıyla ilgili TiO₂ filmleri için Tauc-Lorentz (Jellison, Jr. ve Modine, 1996) ve ZnO filmleri için Tauc-Lorentz Urbach (Ferlauto vd., 2002) dielektrik fonksiyonu modeli kullanılmıştır. Camın absorplama özelliği ve filtrenin yansıtma ile geçirgenliğin tasviri için Saygın Hinczewski ve diğerlerinin (2005) çalışması kaynak olarak alınmıştır. Her durumda da taşıyıcının absorpsiyon etkisi dahil edilmiştir. ZnO'nin direkt, TiO₂'in indirekt band aralığı hesaplanmıştır.

Deneyisel çalışma sonuçları

Şekil 1'de filtrenin yansıtma ve geçirgenlik değerlerinin dalgaboyuna bağlı değişimleri, ayrıca filtre içindeki filmlerin kırma indisleri (n)



Şekil 1. (i) Filtre için deneysel yansıtma (R) ve geçirgenlik (T) değerleri; filtre içindeki katmanların (ii) kırma indisleri (n) ve (iii) absorpsiyon katsayıları (α)

ve absorpsiyon katsayıları (α) gösterilmiştir. Elde edilen filterede, yansıtmanın minimumu %0.808 değeri ile 650 nm dalgaboyunda meydana gelmektedir. Filtrede yansıtma, 635-

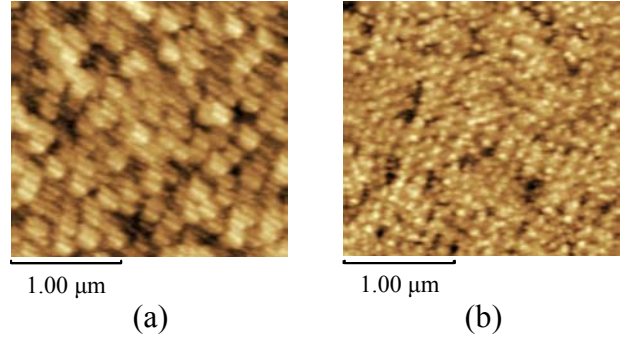
665 nm dalgaboyu aralığı için %1'den, ve 585-720 nm aralığı için %4'den azdır. 300-400 nm dalgaboyları arasında filtre içindeki ZnO'in absorpsiyonu filtre içindeki TiO₂'e göre daha fazladır. Tablo 2'de tek-katman filmlerin ve filtrede karşı geldikleri katmanların optik parametreleriyle beraber kalınlık değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Tek-katman filmlerin ve filtrede karşı geldikleri filmlerin optik parametreleriyle beraber kalınlık değerleri

Parametre	Film	
	TiO ₂	ZnO
Tek-katman kalınlığı (nm)	167.9±0.2	111.2±0.8
Filtredeki kalınlık (nm)	156.7±0.6	80.8±0.2
Tek-katman n ($\lambda=550$ nm)	2.04±0.01	1.40±0.01
Filtredeki n ($\lambda=550$ nm)	2.02±0.01	1.38±0.01
Tek-katman band aralığı (eV)	3.37±0.01	3.25±0.01
Filtredeki band aralığı (eV)	3.53±0.09	3.29±0.01

Tablo 2'de tek-katman filmlerin ve filtrede karşı geldikleri katmanların optik parametreleriyle beraber kalınlık değerleri listelenmiştir. TiO₂ filminin band aralığı değeri tek-katmanda 3.37 eV iken filtrede 3.53 eV'e kaymıştır. ZnO'in band aralığı değeri tek-katmanda 3.25 eV iken filtrede 3.29'a çıkmıştır. Bu da filtre içinde ZnO filminin band aralığının neredeyse aynı kaldığını, TiO₂ filmi içinse çok büyük miktarda arttığını göstermektedir. Başka bir çalışmada TiO₂ filminin indirekt band aralığı 3.50 eV bulunmuştur (Mahalingam ve Edirisinghe, 2007); bu da filtredeki TiO₂'in band aralığı değerine yakındır. 3.2 eV indirekt band aralığı ile de TiO₂ daha önce rapor edilmiştir (Yang vd., 2007), bu sonuç da tek-katman sonuçlarıyla uyum içerisindedir. ZnO filmi için 3.33-3.27 eV (Dimova-Malinovska vd., 2007) olarak rapor edilmiş olan direkt band aralığı değeri bu çalışmadaki ile uyumludur. TiO₂'in kalınlık değeri tek-katmanda 168 nm iken filtrede 157 nm'ye düşmüştür. ZnO'in kalınlığı tek-katman

için 111 nm iken filtrede 81 nm'ye gerilemiştir. $\lambda=550$ nm'de TiO₂'in tek-katmandaki kırma indisi 2.04 iken filtrede bu 2.02 olmuştur. ZnO, tek-katmanda 1.40 kırma indisine sahipken filtrede bu değer 1.38 olarak ortaya çıkmıştır. Bu da her iki film için de, kırma indislerinin tek-katmanlarda ve filtrede neredeyse aynı kaldıklarına işaret etmektedir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanmış ve 450-500°C arasında ısıl işlem görmüş TiO₂ filmlerinin kırma indisi $\lambda=550$ nm için 2 civarında bulunmuştur (Zhang vd., 2001) ve buradaki verilerle uyumludur. Sol-jel kaplama yöntemiyle hazırlanmış ve 550°C'de ısıl işlem görmüş filmlerin kırma indisi $\lambda=550$ nm'de 1.52 civarındadır (Bandyopadhyay vd., 2002) bu da burada bulunan sonuçlara en yakın olan kırma indisi değeridir. Filtredeki ZnO'in kırma indisinin çok düşük olması, çok gözenekli olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 2. Filtrenin ve ZnO bileşenine karşılık gelen tek-katmanın iki boyuttaki AFM görüntüleri: (a) filtre; (b) ZnO

Şekil 2'de filtrenin ve ZnO bileşenine karşılık gelen tek-katmanın iki boyuttaki AFM görüntüleri verilmiştir. Tek-katman TiO₂ ve ZnO filmleri için ortalama karakök pürüzlülük değerleri sırasıyla 0.5 ve 5.2 nm'dir. ZnO filmi filtre içerisinde yer aldığı pürüzlülük değeri 9.2 nm'ye yükselmiştir, yani ZnO filmi cam yerine TiO₂ üstüne kaplandığında yüzeyi daha pürüzlü olmaktadır.

Sonuçlar

TiO₂'in optik band aralığı değeri tek-katmanda 3.37 eV iken filtrede büyük bir artışla 3.53 eV'e kaymıştır. Kırma indisi değeri tek-katmanda ve

filtrede neredeyse aynıdır ve 2.00 civarındadır. TiO₂'in kalınlık değeri tek-katmanda 168 nm iken filtrede 157 nm'ye düşmüştür. ZnO'in kırma indisi değeri tek-katmanda 1.40 iken filtrede 1.38 olmuş ve neredeyse değişmemiştir. Band aralığı değeri tek-katmanda 3.25 eV iken filtrede 3.29 olmuştur. Kalınlığı tek-katman için 111 nm iken filtrede 81 nm'ye gerilemiştir. Filtrede, yansıtmanın minimumu %0.808'le $\lambda=650$ nm'de meydana gelmiştir ve yansıtma 635-665 nm için %1'den ve 585-720 nm için %4'ten az çıkmıştır. Sol-jel yöntemi kullanılarak elde edilen ZnO filminin, TiO₂ filmiyle beraber bir yansıtıcı filtrede kullanılabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma İTÜ Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Prof. Dr. G. Tepehan, Dr. M. Hinczewski ve Araş. Gör. İ. Sorar'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Bandyopadhyay, S., Paul, G.K. ve Sen, S.K., (2002). Study of optical properties of some sol-gel derived films of ZnO, *Solar Energy Materials and Solar Energy Cells*, **87**, 103-113.

Beyer, W., Hupkes, J. ve Stiebih, H., (2007). Transparent conducting oxide films for thin film silicon photovoltaics, *Thin Solid Films*, **516**, 2-4, 147-154.

Chen, D.G., (2001). Anti-reflection (AR) coatings made by sol-gel processes: A review, *Solar Energy Materials and Solar Energy Cells*, **68**, 313-336.

Dimova-Malinovska, D., Angelov, O., Nichev, H., Kamenova, M. ve Pivin, J.C., (2007). Influence of the substrate temperature on the optical and structural properties of magnetron sputtered ZnO thin films doped with Al and Er, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **9**, 2512-2515.

Ferlauto, A.S., Ferreira, G.M., Pearce, J.M., Wronski, C. R. ve Collins, R. W., (2002). Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near-infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics, *Journal of Applied Physics*, **92**, 5, 2424-2436.

Ferro, R., Rodriguez, J.A. ve Bertrand, P., (2008). Peculiarities of nitrogen dioxide detection with sprayed undoped and indium-doped zinc oxide thin films, *Thin Solid Films*, **516**, 8, 2225-2230.

Jellison, Jr., G.E. ve Modine, F.A., (1996). Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region, *Applied Physics Letters*, **69**, 371-373.

Karunakaran, B., Uthirakumar, P., Chung, S.J., Velumani, S. ve Suh, E.K., (2007). TiO₂ thin film gas sensor for monitoring ammonia, *Materials Characterization*, **58**, 8-9, 680-684.

Kim, K.E., Jang, S.R., Park, J., Vittal, R. ve Kim, K.J., (2007). Enhancement in the performance of dye-sensitized solar cells containing ZnO-covered TiO₂ electrodes prepared by thermal chemical vapor deposition, *Solar Energy Materials and Solar Energy Cells*, **91**, 4, 366-370.

Mahalingam, S. ve Edirisinghe, M.J., (2007). Characteristics of electrohydrodynamically prepared titanium dioxide films, *Applied Physics A*, **89**, 987-993.

Sagar, P., Shishodia, P.K., Mehra, R.M., Okada, H., Wakahara, A. ve Yoshida, A., (2007). Photoluminescence and absorption in sol-gel-derived ZnO films, *Journal of Luminescence*, **126**, 800-806.

Saygın Hinczewski, D., Hinczewski, M., Tepehan F.Z., Tepehan ve G.G., (2005). Optical filters from SiO₂ and TiO₂ multi-layers using sol-gel spin coating method, *Solar Energy Materials and Solar Energy Cells*, **87**, 181-196.

Shi, L.X., Shen, H., Jiang, L.Y. ve Li, X.Y., (2007). Co-emission of UV violet and green photoluminescence of ZnO/TiO₂ thin film, *Materials Letters*, **61**, 25, 4735-4737.

Verma, A., Kar, M. ve Agnihorty, S.A., (2007). Aging effect of diethanolamine stabilized sol on different properties of TiO₂ films: Electrochromic applications, *Solar Energy Materials and Solar Energy Cells*, **91**, 14, 645-651.

Yang, H., Zhang, X., Tao, Q. ve Tang, A., (2007). Microwave-assisted sol-gel synthesis and optical property of TiO₂ thin film, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **9**, 8, 2493-2497.

Zhang, Q., Wang, J., Wu, G., Shen, J. ve Buddhudu, S., (2001). Interference coating by hydrophobic aerogel-like SiO₂ thin films, *Materials Chemistry and Physics*, **72**, 56-59.