T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZnO İNCE FİLMLERİNİN YAPISAL, OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNE GEÇİŞ METALİ KATKILARININ ETKİSİ

Hüda Seçil GÜNDÜZ

FİZİK ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2015

Yrd. Doç. Dr. Abdullah GÖKTAŞ danışmanlığında, Hüda Seçil GÜNDÜZ'ün hazırladığı **"ZnO ince filmlerinin yapısal, optik ve dielektrik özelliklerine geçiş metali katkılarının etkisi"** konulu bu çalışma 24/11/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Abdullah GÖKTAŞ .....

Üye :Doç. Dr. Erol EROĞLU .....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat ASLAN .....

Bu tezin Fizik Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. Sinan UYANIK
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma HÜBAK tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 15023

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

İÇİNDEKİLER

SayfaNo

ÖZET……..... i
ABSTRACT ……... ii
TEŞEKKÜR……..... iii
ŞEKİLLER DİZİNİ……..... iv
ÇİZELGELER DİZİNİ……... v
SİMGELER DİZİNİ……..... vi
1. GİRİŞ…….. 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR……..... 3
2.1. Yarıiletkenler.....……..... 6
2.1.1. Yarıiletkenlerin Temel Prensibleri……..... 6
2.1.2. Katkılı Yarıiletkenler ……..... 7
2.1.3. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma.....……..... 8
. 2.1.3.1. Temel Soğurma Olayı ……..... 14
2.1.3.2. Direkt Bant Geçişi ……..... 15
2.1.3.3. İndirekt Bant Geçişi 17
2.1.4. Kırılma İndisi ve Dielektrik Sabiti..... 19
2.1.5. Çinko Oksit (ZnO) Bileşiğinin Özellikleri..... 21
2.1.6. ZnO Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri..... 22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....……..... 25
3.1. Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Tekniği 25
3.2. X-Işınları Kırınımı Analizi ……..... 30
3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ……..... 31
3.4. Ultraviyole-Görünür (UV-Vis) Spektroskopisi..... 33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA..... 34
4.1. Giriş..... 34
4.2. Magnetron Püskürtme Tekniğiyle Üretilen İnce Filmler..... 34
4.2.1. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerinin X-ışını Kırınımı (XRD) Sonuçları..... 34
4.2.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerin EDX Sonuçları..... 37
4.2.3. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM Ölçüm Sonuçları..... 39
4.2.4. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerininin Optiksel Özellikleri..... 41
5.SONUÇLAR..... 50
KAYNAKLAR..... 52
ÖZGEÇMİŞ..... 54

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇİNKO OKSİT (ZnO) İNCE FİLMLERİNİN YAPISAL, OPTİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNE GEÇİŞ METALİ KATKILARININ ETKİSİ

H.Seçil GÜNDÜZ

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Abdullah GÖKTAŞ
Yıl: 2015, Sayfa:54

Bu çalışmada farklı ortalama katkı miktarında (x=%1-9) katkılanan $Zn_{1-x}TM_xO$ (TM=Mn, Co, Fe) ince filmleri başarılı bir şekilde radyo frekans magnetron saçtırma yöntemiyle üretilmiştir. Sonuçlar katkılanmış ve katkılanmamış tüm ince filmlerin öncelikli hegzagonal wurtzite kristal yapılı c-ekseni yönelimine sahip olduğunu göstermiştir. Geçiş metali katkı seviyelerinin artırılmasıyla, özellikle %3 ile %5 geçiş metali Fe katkılı ZnO(ZFO) filmleri haricinde, geçiş metali katkılı tüm filmlerde, kristalleşme kalitesinde bariz bir düşüş gözlenmiştir. Katkısız ZnO ile karşılaştırıldığında, örgü parametresi c, Co katkılı ZnO(ZCO)' da önemli derecede değişmezken, artan geçiş metali katkı oranıyla Mn katkılı ZnO(ZMO) ve ZFO filmlerinde azalmıştır. Homojen ve kalınlıkları yaklaşık olarak 73 ile 115 nm arasında değişen yoğun film yüzeyleri elde edilmiştir. Filmlerde Zn, Mn, Co ve O elementleri ile Zn^{+2}, Co^{+2}, Mn^{+2} ve Fe^{+2} iyonları saptanmıştır. Arttırılan geçiş metali katkı oranıyla optik bant aralığı, katkısız ZnO filmlerine nazaran ZFO ve ZCO filmerinde azalırken, ZMO filmleri için artmıştır. Tüm filmlerin arasında, sırasıyla %1-9 ortalama geçiş metali katkı seviyeleri için, en yüksek sönüm katsayısı ZCO filmlerinde, en yüksek kırılma indisi ve dielektrik sabiti ZMO ve ZFO filmerinde elde edilmiştir. Bu durum olası muhtemel filmlerin değiştirilen geçiş metali katkı seviyesi ve geçiş metali türünden dolayı artan soğurma katsayısına, yoğunluğuna ve kutuplaşmasına bağlanmıştır. Bu gözlemler bize optik ve optoelektronik cihazlar için istenilen daha yüksek optik ve dielektrik sabitlerine sahip geçiş metali katkılı ZnO filmleri seçmek için uygun katkı maddesi türü için fırsat sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Magnetron saçtırma, Mn katkılı ZnO, Co katkılı ZnO, Fe katkılı ZnO, ince film

ABSTRACT

MSc Thesis

EFFECT OF TRANSİTİON METALS DOPİNG ON THE STRUCTURAL, OPTİCAL AND DİLEKTRİC PROPERTİES OF ZnO THİN FİLMS

H.Seçil GÜNDÜZ

Harran University
Graduate school of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Abdullah GÖKTAŞ
Year:2015, Page: 54

$Zn_{1-x}TM_xO$ (TM= Mn, Co, Fe) thin films doped with different average doping level (x=1-9 %) were successfully deposited on glass substrates by radio frequency magnetron sputtering. The results showed that all the undoped and doped films possessed a strong preferential c-axis orientation with a hexagonal polycrystalline structure. With increased TM doping level, a clear decrease in crystalline quality was found for all the TM doped ZnO films except for Fe doped ZnO (ZFO) films especially with average TM doping level of 3 and 5 %. Compared to the undoped ZnO, the lattice parameter, *c*, was not significantly changed in Co doped ZnO (ZCO), whereas it decreased for Mn doped ZnO (ZMO) and ZFO films with increasing TM doping ratio. Homogeneous and dense film surfaces with the thickness approximately changed from 73 to 115 nm were obtained. The presence of the Zn, Mn, Co and O elements and Zn^{2+}, Co^{2+}, Mn^{2+} and Fe^{2+} ions were detected in the films. By increased TM doping level, the optical band gap was increased for the ZMO films, while decreased for the ZFO and ZCO films compared with the undoped ZnO films. Among all the films, the highest extinction coefficient in ZCO films, the highest refractive index and dielectric constant in ZMO and ZCO films were obtained for the average TM doping level of the 1-9, 1, 3 and 5, 9 %, respectively. These were likely attributed to the increased absorption coefficient, density and polarization of the films by changed the TM doping level and TM type. These observations give us the opportunity for the suitable dopant type and content to choose the desired TM doped ZnO films with higher optical and dielectric constants for the optical and optoelectronic devices.

KEY WORDS: Magnetron sputtering, Mn-doped ZnO, Co-doped ZnO, Fe-doped ZnO, Thin film

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde bana her anlamda destek veren, kendisi ile çalışmaktan onur duyduğum değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Abdullah GÖKTAŞ' a, gösterdiği ilgi, hoşgörü ve yardımları için teşekkür ederim.

Harran Üniversitesinde, yapmış olduğum XRD ve SEM ölçümlerinde değerli vaktini ayırıp yardımcı olan, Harran Üniversitesi Fizik Bölümü doktora öğrencisi, Ahmet TUMBUL'a şükranlarımı sunarım.

Yaşamım boyunca beni her konuda destekleyen değerli aileme ve çalışmalarım sırasında beni her an sabır ve anlayışla karşılayan nişanlıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu çalışmayla ilgili desteklerini, öğütlerini ve yardımlarını esirgemeyen yukarıda isimlerini belirttiğim ve belirtemediğim bütün değerli hocalarıma, dost ve arkadaşlarıma bir daha en büyük ve en sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Yarıiletkenlerde elektronik bant yapısı(a)ve enerji bant diyagramı(b) …… 6
Şekil 2.2. n-tipi yarıletken (a) ve p-tipi yarıletken(b) elektron alışverişi..... 8
Şekil 2.3. İnce bir filmde çok yansımalı ışık geçirimi..... 12
Şekil 2.4. Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu …… 14
Şekil 2.5. Direkt Bant Geçişi..... 17
Şekil 2.6. Yarıiletkende indirekt vadiler arası indirekt bant geçişi …….... 18
Şekil 2.7. Çinko oksitin birim hücresi..... 22
Şekil 3.1. Saçtırma sürecinin şematik gösterimi……..... 26
Şekil 3.2. Magnetron saçtırma sisteminin şematiği……..... 28
Şekil 3.3. Ana çemberde plazma oluşma durumu..... 28
Şekil 3.4. Ana çemberde filmin depolanması……..... 29
Şekil 3.5. X-ışınlarının kristal tarafından kırınıma uğratılması..... 30
Şekil 3.6. Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi…..... 32
Şekil 4.1. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin XRD spektrumları……... 35
Şekil 4.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin EDX spektrumları …….. 37
Şekil 4.3. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM görüntüleri ……..... 39
Şekil 4.4. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM kalınlıkları görüntüleri……..... 40
Şekil 4.5. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin geçirgenlik, soğurma ve yansıma optik spektrumları 42
Şekil 4.6. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin hν enerjisinin fonksiyonu olarak $(\alpha h\nu)^2$ değişimi..... 43
Şekil 4.7. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin k-λ değişimi..... 45
Şekil 4.8. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin n-λ değişimi..... 46
Şekil 4.9. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin ε_r-λ değişimi……..... 48
Şekil 4.10. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin ε_i-λ değişimi……..... 49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. ZnO' nun fiziksel özellikleri.....…….23
Çizelge 4.1. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerin bazı yapısal özellikleri…..……..35
Çizelge 4.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin EDX analiz sonuçları.....……...38

SİMGELER DİZİNİ

Δx	Soğurmaya uğrayan materyalin kalınlığı
I_T	Ortamdan geçen ışının şiddeti
I_0	Materyale gelen ışının şiddeti
I	Film içine giren ışık miktarı
α	Lineer soğurma katsayısı
ΔI	Δx kalınlığındaki bölgeden geçtikten sonra gelen ışığın şiddetindeki azalma
λ	Gelen fotonun dalgaboyu
h	Planck sabiti
θ	Bragg açısı
c	Işık hızı
E_c	İletim bandı enerji seviyesi
E_v	Valans bandı enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_f	Fonon enerjisi
m_e^*	İletim bandındaki elektronların etkin kütlesi
m_h^*	Valans bandındaki hollerin etkin kütlesi
ν	Işığın frekansı
A	Soğurma
T	Geçirgenlik
R	Yansıma
n	Kırılma indisi
k	Sönüm katsayısı
ε_i	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ε_r	Dielektrik sabitinin reel kısmı
ZnO	Çinko oksit
RF	Radyo frekens
XRD	X-ışını kırınımı
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
EDX	X-ışını analizi
ZMO	Mangan katkılı çinko oksit
ZCO	Kobalt katkılı çinko oksit
ZFO	Demir katkılı çinko oksit
FHWM	Yansıma düzlemine ait pikin maksimum yarı pik genişliği

1.GİRİŞ

Teknolojinin temelleri malzemelerin optik, mekanik ve elektronik özellikleri dayanmaktadır. Malzemelerin bu temel özellikleri malzemede bulunan atomların özelliklerine ve uzayda dizilimlerine bağlıdır. Bu temel bileşenleri araştırmak ise katıhal fiziğinin temel konuları arasındadır. Bu özellikleri incelemek için deneysel çalışmalar yapılabildiği gibi bazı teorik yaklaşımlarda bulunarak da incelenebilir. Bilim ve teknolojideki modern değişimlerle malzeme bilimi sürekli gelişmektedir. Gelişen bilim ve teknolojinin ışığında birçok yeni malzeme üretilerek, günlük yaşantımıza pratik kolaylık sağlamaktadır. Son yüzyılın en önemli malzemelerin başında yarıiletkenler gelmektedir. Yarıiletkenlerin keşfiyle beraber, bilgilerin depolanmasında, detektörlerde, bileşik devrelerde ve elektronik aygıtlarda olduğu gibi çok farklı uygulamalarda yarıiletkenler yaygınca kullanılmaktadır.

Bilim ve teknolojinin gelişimiyle birlikte toplumlarda gelişmiş özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyaç zamanla artmaktadır. Artan bu ihtiyaçlarla birlikte, insanlar yarıiletkenlere daha gelişmiş fonksiyonlar kazandırmak amacıyla, yarıiletkenlerin özelliklerini kendi doğrultularında değiştirmeye çalıştılar. Aynı nedenden dolayı bu tezin amacı, modern toplumların ihtiyaçlarını karşılayabilecek niteliklere sahip yani malzemelerin üretilmesine katkıda bulunmaktır. Yeni üretilecek olan malzemenin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için, ilk olarak temel amacı bilinmelidir. Temel amacın belirlenmesiyle birlikte istenilen özelliklere ve fonksiyonlara sahip malzeme üretilebilir. Bu temel amaca dayanarak, bu tezde ZnO ince filmlerinin optik ve elektronik uygulamalardaki etkinliğini arttırmak için Mn, Fe ve Co ile katkılandırılarak, ZnO malzemesinin yapısal ve optiksel özelliklerinin geliştirilmesidir. Ayrıca bu katkı türlerinin ZnO ince filminin yapısal, optiksel ve dielektrik katsayısına etkisi araştırılacaktır. Materyallerin soğurma katsayısı, kırılma indisi ve dielektrik sabiti gibi optik sabitleri geçirgenlik, soğurma ve yansıma spektrumu analiz edilerek değerlendirilecektir. Mn, Fe ve Co gibi farklı geçiş metali elementleri Zn ile benzer iyonik boyutları ve farklı elektronik kabuk yapıları dolayısıyla daha fazla ilgi görürler. Dolasıyla ZnO ‘in yapısal, optik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek için iyi bir malzeme olarak aday görülebilir.

II-IV tabanlı yarıiletken bileşikler arasında en önemlilerinden birisi ZnO yarıiletkenidir. Çünkü, sahip olduğu doğrudan geniş bant aralığı (≈ 3.4 eV), yüksek ısı iletimi ve yüksek eksiton bağlanma enerjisinden (60 meV) dolayı ışık yayınım aygıtları gibi bir çok aygıtın yapımında kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

ZnO, 1935 yılından günümüze kadar araştırılan bir malzemedir. Ayrıca saydam ince film transistörler, ışık dedektörleri, mavi ve mor ötesi alanda çalışan LED ve lazer diyotlar için de potansiyeli olan bir malzemedir (Janottı ve ark., 2009). Bu özelliklerinden dolayı ZnO yarıiletkenlerine yeni fonksiyonlar kazandırmak için geçiş metalleri veya lantanit grupları kullanılarak katkılandırılmaktadır (Göktaş, 2013).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çinko oksit (ZnO) yüksek elektriksel ve optik geçirgenliğe, düşük bant aralığına sahip olması nedeniyle cihazların yapımında tercih edilen bir materyal olmuştur. Bu özelliklerinden dolayı ZnO üzerinde çalışıldığından bu yana çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak kullanım amaçlarına hizmet edecek biçimde, en kaliteli ve en ucuz olacak şekilde üretilmeye çalışılmıştır.

Fe veya Co katkılı ZnO nano parçacıklarda dielektrik katsayısı önemli bir derecede artmıştır (Sıngh ve ark., 2013). Bu özelliklere sahip malzemeler seyreltilmiş manyetik yarıiletkenler olarak bilinirler. Bu tüm özellikleri bir arada taşıyan malzemeler yarıiletken tabanlı aygıtlara büyük bir avantaj sağlayacaktır. Bu avantajların en başında aygıt boyutları küçülecektir. Aygıtlar daha az enerji ile daha hızlı çalışacaktır. ZnO'nun saydam özellikte olması ve geçiş metalleri ile katkılanarak ferromanyetik özellik göstermesinden dolayı manyetik-optik, gibi cihazların üretiminde kullanılabilir bir malzeme yapmıştır.

2005 yılında Wardle ve ark., Co, Ni, Fe, Cu katkılı ZnO'yu DFT yöntemi ile elektronik ve manyetik özelliklerini araştırmışlardır, katkılamadan kaynaklanan 3d bantlarının, elektronik ve manyetik özellikleri üzerinde güçlü etkisi olduğu görülmüştür (Wardle ve ark., 2005).

Mekanik alaşımlama yöntemiyle, Ar ortamında hazırlanan, %3, %5, %7 ve %9 Fe katkılı ZnO disk biçiminde tozlarda, c örgü parametresi katkı miktarıyla orantılı olarak artarken, kristallik boyutlar azalmıştır (Lın ve ark., 2007).

Daha önce yapılan çalışmalarda optiksel saçılma ve geçirgenlik spektrumlarından faydalanılarak, kırılma indisi, sönüm katsayısı, optiksel geçirgenlik ve dielektrik katsayıları La-katkılı ZnO ince filmlerinde incelenmiştir (Huang ve ark., 2014). Sonuçlarda dielektrik katsayısı, kırılma indisi, sönüm katsayısı ve optiksel geçirgenliğin La katkısıyla arttığı rapor edilmiştir.

Wang ve ark., (2010) sol-jel döndürme yöntemiyle hazırladıkları Na-katkılı ZnO ince filmlerinde kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısının (k) Na katkı miktarının arttırılmasıyla arttığını, optiksel band gap değerinin önce arttığı sonra doğrusal olarak Na katkı miktarıyla azaldığı rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, hazırlanan $Zn_{1-x}Na_xO$ ince filmlerinin dielektrik katsayılarının Na katkı oranıyla beraber arttığı gözlemlenmiştir.

Çinko nitrat çözelti kullanılarak farklı alt taban sıcaklıklarında saçtırma yöntemiyle ZnO ince filmler üretilmiştir. Filmlerin üretim sıcaklığının yapı üzerindeki etkileri, optik ve elektriksel özellikleri çalışılmıştır. Bu çalışmada 180 °C gibi bir kritik sıcaklık belirlenmiştir. Bu sıcaklığın üzerinde üretim yapıldığında üretim sonucunda ortaya çıkan ZnO'nun c yöneliminde polikristal özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu sıcaklığın altında yapılan üretim çalışmalarında ise ZnO'nun toz halinde kaldığı, filmin üretilemediği görülmüştür. Tavlama işleminin uygulanmasıyla bütün filmlerin bant aralığının 3.30 eV olduğu belirlenmiştir. Işık uygulandıktan sonra katkılanmamış (as-grown) kararlı durumdaki ürünler için fotoiletkenliğin bir hafta civarında çok yavaş olarak bozulduğu gözlenmiştir. Kararlı durum için aydınlık (gün ışığı) fotoiletkenliğin doyuma çok yakın olduğu ve bu durum için aydınlık fotoiletkenliğin karanlık değerinden daha geniş büyüklükler için en fazla dört duruma kadar sahip olabileceği tespit edilmiştir. 400 °C de azot ortamında tavlama işlemine tabi tutulan filmlerin fotoiletkenlik değerleri bütün filmler için aydınlıkta 10^{-3} $(\Omega.cm)^{-1}$, karanlıkta ise 10^{-4} $(\Omega.cm)^{-1}$ değerine sahip olduğu ölçülmüştür (Studenikin, 1997).

DC reaktif magnetron saçtırma yöntemiyle üretilen ZnO ince filmlerin yapısal ve optik özellikleri üzerine depolama sonrası tavlama ve iyon ışın bombardımanının etkisi araştırılmıştır. X-ışın kırınımı (XRD, X-ray diffraction) sonuçlarından alt taban yüzeyine dik sadece (002) c eksen yönelimli ZnO fazları gözlenmiştir. Depolama sonrası hem tavlama hem de iyon bombardımanı etkisiyle kırınım piklerinin daraldığı dolayısıyla tanecik boyutunun arttığı ve kırınım piklerinin daha yüksek 2θ değerlerine kaydığı bunun sonucunda da gerilimin azaldığı gözlenmiştir. Geçirgenlik

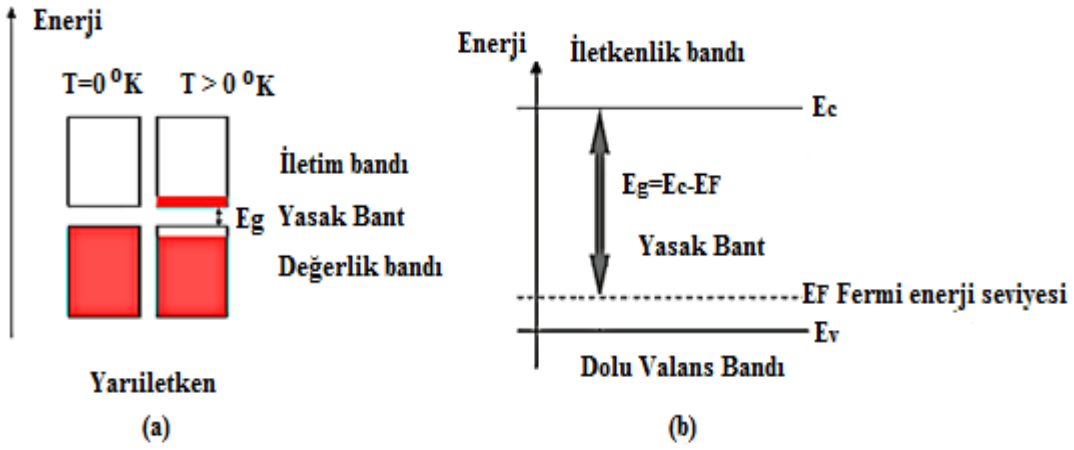
spektrometresinden tüm filmlerin 400–1200 nm arasında yüksek geçirgenlik sergiledikleri ve başlıca soğurmanın başladığı ultraviyole bölgesinde keskin bir düşüş yaptığı gözlenmiştir. Depolama sonrası tavlanan örneklerin bant aralığının ise azaldığı gözlenirken, iyon bombardımanı yapılan örneklerin bant aralığının arttığı gözlenmiştir (Hong ve ark., 2006).

RF magnetron saçtırma yöntemiyle ZnO ince filmler önce düşük sıcaklıkta çok katlı tabakalar (Al_2O_3) üzerine depolanmış daha sonra elde edilen bu tabaka üzerine yüksek sıcaklıklarda yüksek kalitede ZnO ince filmler depolanmıştır. Bu filmlerin optik özellikleri araştırılmıştır. Düşük sıcaklıkta elde edilen çok katlı tabakalar üzerine büyütülen ZnO ince filmlerin x-ışın kırınımı (XRD, X-ray diffraction) sonuçlarından örgü uyumunun ve kristalliğinin geliştiği gözlenmiştir. Ayrıca fotolüminesans spektrumunda kusurlarla ilgili fotolüminesans şiddetinin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu ve serbest-eksiton fotolüminesansın gözlendiği dolayısıyla yüksek kaliteli filmler elde edildiği görülmüştür (Shımomura, 2005).

2.1. YARIİLETKENLER

2.1.1. Yarıiletkenlerin Temel Prensibleri

Katı maddeler, iletkenliklerine göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan şeklinde üç gruba ayrılırlar. Bu üç madde arasındaki fark, katıların bant teorisi ile açıklanabilir. Yarıiletken maddelerin elektriksel iletkenliği elektron ve holler ile sağlanır. Yarı iletken maddelerin enerji bantlarının yapısı yalıtkan maddelerle benzer ancak aralarında önemli bir fark vardır. Yarıiletken maddelerde tamamen elektronlarla dolu olan değerlik bandı ile boş olan iletkenlik bandı arasında kalan yasak enerji aralığı, yalıtkan maddelere göre daha küçüktür. Bu aralık genişliği farkından dolayı yarıiletken maddelerin elektriksel iletkenliği sıcaklık ile artar. Fakat mutlak sıfır noktasında (T= 0ºK) elektriksel iletkenliği bakımından yalıtkan gibi davranır (Şekil 3.1). Yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralığı yaklaşık 4 eV' dan küçük iken, yalıtkanlarda yaklaşık 4 eV' dan büyüktür. Yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile yasak enerji bant aralığı belirlenir. ZnO için yasak enerji bant aralığı ise 3,3 eV olarak bilinmektedir. Oda sıcaklığındaki bir yarıiletkenin özdirenci 10^{-3}-10^{9} Ω cm, yalıtkanların özdirenci ise 10^{14} - 10^{22} Ω cm mertebesindedir.



Şekil 2.1. a) Yarıiletkenlerde elektronik bant yapısı b) Yarıiletkenin enerji bant diyagramı

En iyi bilinen ve yaygın şekilde kullanılan yarıiletkenler IV. Grup elementlerinden Ge ve Si elementleridir. Yarıiletkenlerin diğer önemli kısmı ise III-V bileşikleri (GaAs, InSb, GaP, InAs...) oluşturur. Bu tür elementler kübik yapıda kristalleşir ve bağ yapısı genellikle kovalenttir. Yarıiletkenlerin diğer bir grubu ise II-IV bileşiklerdir (CdZnS, ZnS, ZnO, CdS, CdSSe...). Bu bileşikler ise bağlanma çeşitleri bakımından iyonik ve kovalent olup hem kübik hem de hegzagonal yapıda kristalleşirler (Bulun, 2010).

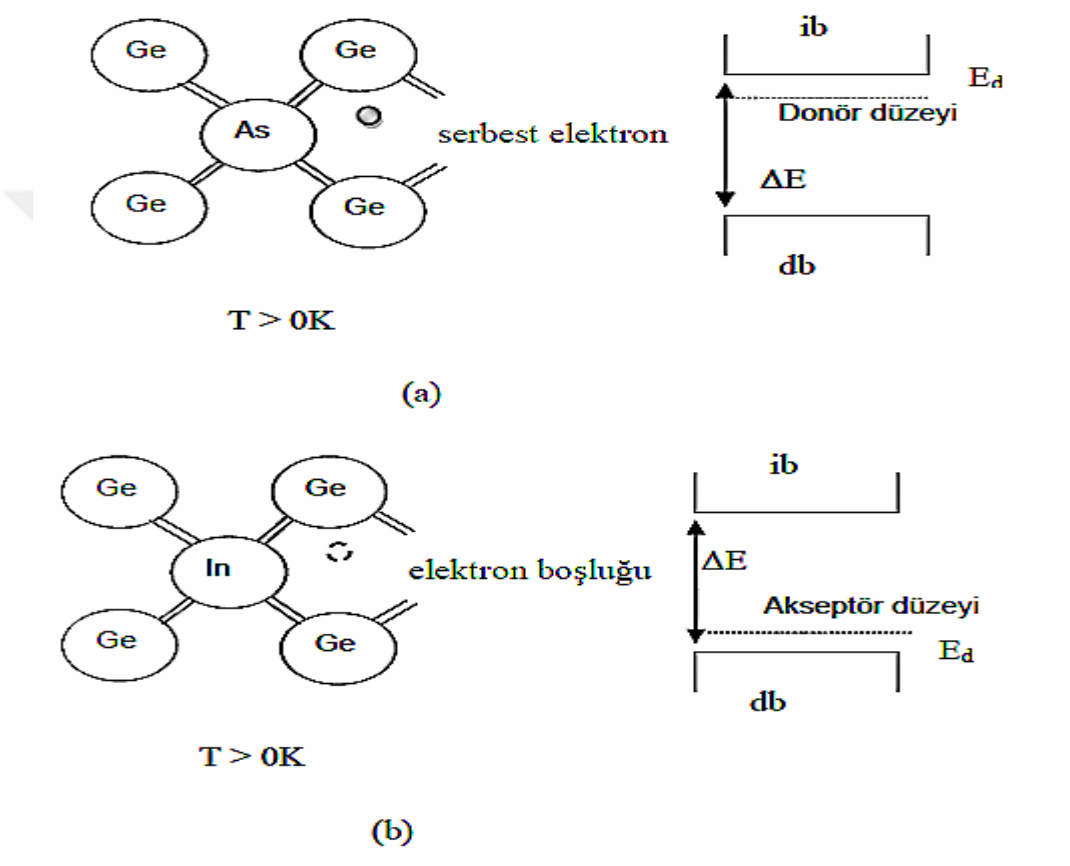
2.1.2. Katkılı Yarıiletkenler

Saf yarıiletkenler içerisine az miktarda yabancı atomlar katkılandırılarak katkılı yarıiletkenler elde edilir. Genellikle yarıiletken devre elemanları hazırlanırken katkılı yarıiletkenler kullanılır. Yarıiletkenlerin elektriksel ve optiksel özellikleri kristal içerisine katkılandırılan yabancı atomların sayısına ve cinsine bağlıdır. Katkılandırılan yabancı atom, maddenin doğal enerji bant yapısını bozarak kendine özgü enerji düzeyleri oluşturur. Buna göre yarı iletken içine giren atom ortama elektron vererek iyonlaşır (verici veya donör) ve iletkenliğe katkıda bulunursa ‘n tipi yarıiletken’, yarıiletken içine giren atom ortamdan elektron alarak iyonlaştığında (alıcı veya akseptör) ve iletkenliğe katkıda bulunduğunda ‘p tipi yarıiletken’ ortaya çıkar (Şekil2.2.)

Şekil 2.2. a’da saf germanyum kristalinin içine arsenik (As) atomunun katkılandırılması gösterilmiştir. Arsenik atomunda beş elektron bulunur ve bu beş elektronun dördü germanyum atomlarının elektronları ile kovalent bağ kurarken geriye kalan beşinci elektron daha zayıf bağlanması sonucu kolaylıkla iletkenlik bandına çıkabilmektedir. Bir anlamda iletkenlik bandına ulaşan elektronların (negatif yük taşıyıcılarının) hareketleri sonucu çıktığı bu tür yarıiletkenler ‘n-tipi’ yarıiletkenlerdir.

Şekil 2.2. b’de ise saf germanyum kristalinin içine indiyum (In) atomun girmesi gösterilmiştir. İndiyum atomları boş kalan yörüngelerini doldurmaya çalışırken kendilerine komşu olan germanyum atomlarının elektronlarından birini kendine

doğru çekerek, çekilen elektronun yerinde elektron boşluğu oluşturacaktır. Bu boşluklar germanyum içindeki elektronlar tarafından doldurulurken kristal içinde elektronların hareketine zıt yönde pozitif yüklü boşlukların hareket etmesi sonucu bir akım oluşmasına sebep olur. Bu oluşan elektriksel iletkenliğin pozitif yüklü elektron boşluklarının hareketleri sonucu ortaya çıktığı yarıiletkenler 'p-tipi' yarıiletkenlerdir (Bulun, 2010).



Şekil 2.2. a) n-tipi yarıiletken ve b) p-tipi yarı iletken elektron alışverişi

2.1.3. Yarıiletkenlerde Optik Soğurma

Yarıiletkenlerde bant aralığının belirlenmesinin en kolay yolu soğurma spektrumunun ölçülmesidir. Soğurma; yarıiletkene gelen elektromanyetik dalga ile maddedeki elektrik yüklerinin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olayıdır.

Soğurma sürecinde, enerjisi bilinen bir fotonun düşük enerji seviyesindeki elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılması şeklindedir. Bu şekilde mümkün olan geçişler yarıiletkenin yasak enerji aralığını ve bant tipi hakkında bilgi verebilir.

Yarı iletkenlerde ışığın soğurulması şu şekillerde meydana gelmektedir:

a) Temel soğurma olayı,
b) Eksitonların soğurulması,
c) Serbest taşıyıcıların soğurulması,
d) Katkı atomlarının (impurity) soğurulması,
e) Sıcak elektron (hot electron) yardımıyla soğurma,
f) Eş elektronik tuzaklara (isoelectronic trap) bağlı soğurma,
g) Akseptör-donör arası geçişler,
h) Bant içi (intraband) geçişler,
i) Örgü soğurulması.

Yukarıda verilmekte olan soğurma olaylarından bazıları bir yarı iletken materyalinde aynı anda gerçekleşebilir. Soğurucu özelliğe sahip örnek üzerine tek renkli ışık demetinin düşürüldüğünü düşünelim ve gelen ışığın bir kısmının örneğin ilk yüzeyden ve diğer bir kısmında ışığın örneğin dış yüzeyden ayrılırken yansıdığı gerçeğini ihmal edelim. Bu durumda gelen ışığın şiddeti I_0 ve ortamdan geçen ışığın şiddeti I_T olmak üzere iki değer elde edilir. Soğurucu özelliğe sahip örneğin çok ince olduğunu düşünürsek ışık Δx kalınlıktaki bölgeden geçtikten sonra gelen ışığın şiddeti -ΔI kadar azalır, azalma ilk şiddet ve Δx' e bağlıdır.

$$-\Delta I = I_T - I_0 = I_O \alpha \Delta x \qquad (2.1)$$

Yukarıdaki denklemde soğurucu ortamın ve ışığın dalgaboyunun karakteristiğini gösteren α sabiti, soğurma katsayısıdır. Işığın iki ya da daha fazla ince Δx kalınlığındaki tabakalardan geçtiğini düşünülür. Bu durumda soğurma katsayısı, verilen materyalin özelliğini gösterecek ve gelen ışın şiddetinden bağımsız olacaktır. Böylece plakanın arkasına Δx kalınlığındaki yerleştirilen ikinci plaka ile

ilk plakadan geçen ışığın şiddeti biraz daha azalacaktır. Ancak gelen ışık şiddeti birinciye gelen ışık şiddetinden daha az olacağından kayıp olacaktır. Bu durumda mutlak kayıp az miktarda olsada her iki tabakadan olan ışık kaybı oranı eşit durumdadır. Bu durum N tane tabaka olsa da geçerli olur. Eşitlik 2.1'den α çekilirse;

$$\alpha = -\frac{\Delta I}{I_0 \Delta x} \tag{2.2}$$

elde edilecektir. Burada α soğurucu materyalin her birim kalınlıktan kaynaklanan azalma oranını veya soğuruculuğunu göstermektedir. Katmanları dx gibi çok küçük kalınlıklara indirgersek, ışık her katmanı geçerken soğurulan ilk ışık şiddeti oranının kesri olan $\frac{dI}{I_0}$ oranı böylece,

$$\frac{dI}{I_0} = -\alpha dx \tag{2.3}$$

şekline gelecektir. Toplam x kalınlığından geçen ışık şiddetindeki azalmayı bulmak için bu ifade, x = 0 da I_0 ve x = x te I_T olmak üzere integre edilirse I_T

$$\int_0^x \frac{dI}{I_0} = -\alpha \int_0^x dx \tag{2.4}$$

$$\ln\left(\frac{I_T}{I_0}\right) = -\alpha x \tag{2.5}$$

$$I_T = I_0 e^{-\alpha x} \tag{2.6}$$

olacaktır. Yukarıdaki denklemlerden eşitlik 2.6 Lambert tarafından geliştirilen soğurma yasası olarak bilinir. Optik soğurma için Beer-Lambert yasası (Bube, 1970),

$$\alpha = \frac{1}{I(\lambda)} \frac{dI(\lambda)}{dx} \tag{2.7}$$

şeklinde yazılabilir. Burada α ise soğurma katsayısını, $I(\lambda)$ ışık şiddetini, x ortam içinde alınan yolu göstermektedir. Yansıma R ise,

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k^2}{(n_2 + n_1)^2 + k^2} \tag{2.8}$$

şeklinde yazılabilir. Burada n_2 ve n_1 ikinci ve birinci ortamların kırılma indislerinin gerçel kısmı, k ise sanal kısmı, R yansıma katsayısıdır. Görünür bölgede n, k dan çok büyük olduğu için k^2 terimi ihmal edilebilir. Böylece eşitlik 2.8 ,

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \tag{2.9}$$

halinde basit hale gelmiştir. İnce bir filmde toplam geçirgenliği bulabilmek için Şekil 2.3'de gösterildiği gibi iki bölge alabiliriz. Girişim ihmal edildiği zaman x kalınlığındaki bir ince filme I_0 şiddetindeki tek renkli ışık düşürülürse film içerisine giren ışık miktarı I,

$$I = (1 - R) I_0 \tag{2.10}$$

şeklinde yazılabilir. İkinci bölgeye ulaşan ışık şiddeti ise,

$$I = I_0 (1 - R) e^{-\alpha x} \tag{2.11}$$

dir. Filmden geçen ışık miktarı ise,

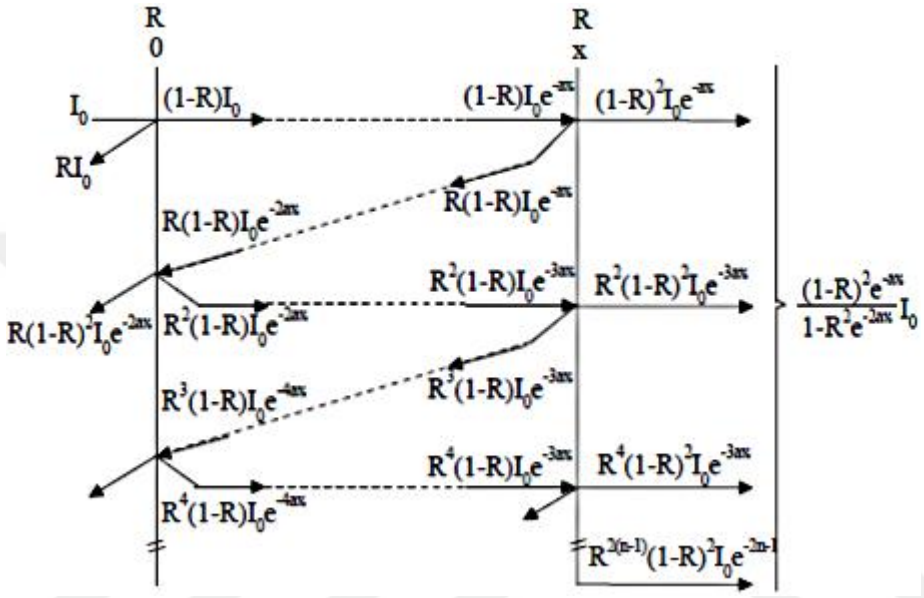
$$I = R(1 - R) I_0 e^{-\alpha x} \tag{2.12}$$

dir. Bu şekilde iç yansımalar Şekil 2.3' de görüldüğü gibi devam ettirilirse yansıyan ışık miktarının her bir yansımada bir,

$$I = R^{2n}(1-R)^2 I_0 e^{-(2n+1)\alpha x} \tag{2.13}$$

terimi kadar arttığı görülmektedir.

Bu katkılar gözönüne alındığında filmin toplam ışık geçirgenliğinin,



Şekil 2.3. İnce bir filmde çok yansımalı ışık geçirimi (Pankove, 1971)

$$I = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha x}\left(\sum_n R^{2n} e^{-2n\alpha x}\right) \tag{2.14}$$

olduğu görülür ki buda geometrik bir seri olduğunu ortaya koyar. Böylece toplam geçirgenlik örnek tarafından yansıtılan ışık şiddetinin örnek üzerine gelen ışık şiddetine oranı,

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{2.15}$$

şeklinde tanımlanır. Bu iç yansımalar şekildeki gibi devam ettirilirse toplam geçirgenlik,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha x}}{1-R^2 e^{-2\alpha x}} \tag{2.16}$$

şeklinde indirgenir.

Bu son denklemde çok soğurucu bölge için $x \to 0$ yaklaşımı yapıldığında;

$$T = (1-R)^2 e^{-\alpha x} \tag{2.17}$$

T, sade bir hal alır. Burada R ve x bilinirse, eşitlik α için çözülebilir.

$$A = \log_{10}\left(\frac{1}{T}\right) A = -\log_{10} T \tag{2.18}$$

$$T = (1-R)^2 e^{-\alpha x} \tag{2.19}$$

$$2,3\log_{10} T = \ln\left[(1-R)^2 e^{-\alpha x}\right] \tag{2.20}$$

$$-2,3A = \ln(1-R)^2 - \alpha x \tag{2.21}$$

$$\alpha = \frac{1}{x}\left[2,3A + \ln(1-R)^2\right] \tag{2.22}$$

elde edilir. Soğurma katsayısı, denklemdeki R yansıma değeri içeren kısmı ihmal ederek hesaplanmaktadır. A ifadesi spektrometreden aldığımız soğurma verileridir. Kısaca,

$$\alpha = \frac{1}{x}[2,3A] \tag{2.23}$$

Diğer soğurma katsayısı hesaplama formülü ise,

$$\alpha = -\frac{1}{x}\left[\ln\left(\frac{T}{100}\right)\right] \tag{2.24}$$

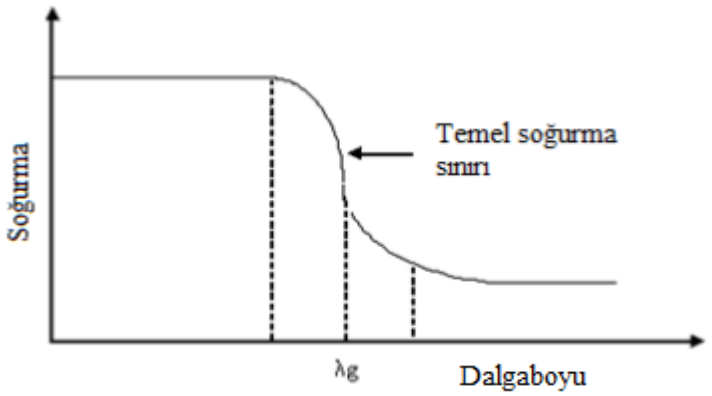
Soğurma katsayısı hesaplanıp optik karakterizasyonda kullanılabilir.

2.1.3.1. Temel Soğurma Olayı

Temel soğurma yarıiletkende, valans bandındanda bulunan bir elektronun gelen ışından foton soğurularak iletim bandına geçmesi olayıdır (Şekil 2.4). Bu olayın gerçekleşmesi için yarıiletken üzerine düşen fotonun enerjisi yasak enerji aralığına eşit veya yasak enerji aralığından büyük olması gerekir. Bu durumda gelen fotonun frekansı V,

$$V \geq \frac{E_g}{h} \tag{2.25}$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.4. Yarıiletkende Temel Soğurma Spektrumu

Gelen fotonun dalga boyu λ_g ise,

$$\lambda_g \leq \frac{hc}{E_g} \tag{2.26}$$

dir. Burada *h* planck sabitini *c* ise ışık hızını gösterir.

Şekil 2.4' de görülen yarıiletken temel soğurma spektrumunda. λ_g dalgaboyuna yakın boylarında artış gözükürken, λ_g dalga boyundan sonra denge değerine ulaşmaktadır.

Yarıiletken λ_g dalgaboyundan daha küçük dalga boyunda ise kuvvetli bir soğurucu özelliği gösterirken, λ_g dalga boyundan daha büyük dalga boyunda ise hemen hemen geçirgen özellik gösterir. Bu iki bölgeyi birbirinden ayıran sınır bölgesine, temel soğurma sınır bölgesi denilmektedir. Yarıiletkenin temel doğurma sınır bölgesinde direkt ve indirekt olmak üzere iki geçiş olayı vardır. Ayrıca bant uzantıları arasında da geçişler olma olasılığı olabilir (Yavuz, 2012).

2.1.3.2. Direkt Bant Geçişi

Yarıiletken materyalinde iletim bandının minimum değerinde ve değerlik bandının maksimum değeri enerji-momentum uzayında aynı $\vec{k}$ değerine sahip olabilirler$\left(\Delta\vec{k}=0\right)$. Böyle bir durumda değerlik bandından bir eletronun iletim bandına geçmesi olayına direk geçiş denir. Direk bant geçişinde gelen fotonun enerjisi önemlidir. Eğer gelen fotonun enerjisi, yarıiletkenin enerji aralığına eşit ise Şekil 2.5' de 1 geçişi olarak; eğer gelen fotonun enerjisi, yarı iletkenin enerji aralığından büyük ise Şekil 2.5' de 2 geçişi olarak görülür. E_{ilk} ilk durum E_{son} son durum enerji seviyesi ise,

$$E_{son} = h\nu - E_{ilk} \tag{2.27}$$

olarak ifade edilir. Parabolik bantlarda, son durum enerjisi ile yasak enerji aralığı arasındaki fark alınarak ilk enerji seviyesi elektronlar için,

$$E_{son} - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \tag{2.28}$$

holler için,

$$E_{ilk} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \tag{2.29}$$

ile verilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi, m_h^* ise holün etkin kütlesini göstermektedir. E_{son} ve E_{ilk} değerleri denlem (2.27)' de yarine yazıldığında,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \tag{2.30}$$

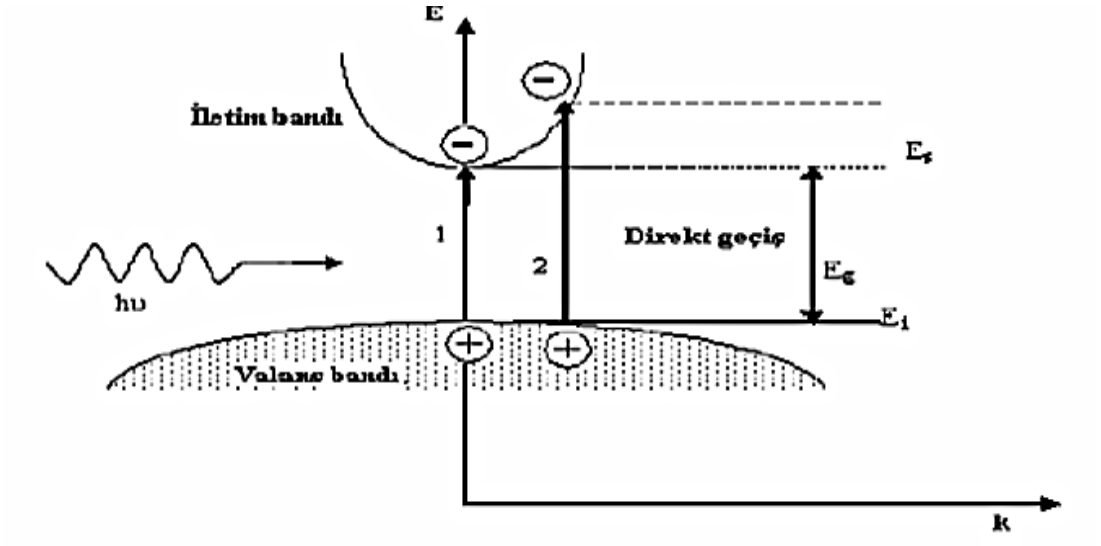
bağlantısı elde edilir. Direkt geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol etkileşimi dikkate alınmazsa soğurma katsayısı α gelen fotonun enerjisine,

$$\alpha(h\nu) = A^*\left(h\nu - E_g\right) \tag{2.31}$$

eşitliğiyle bağlıdır. Burada A^*,

$$A^* \approx \frac{q^2\left(2\dfrac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*}\right)^{3/2}}{n_o c h^2 m_e^*} \tag{2.32}$$

ifadesiyle verilen bir sabittir.



Şekil 2.5. Direkt Bant Geçişi

Direkt bant geçişinde soğurma katsayısı ile fotonun enerjisi arasındaki bağıntı,

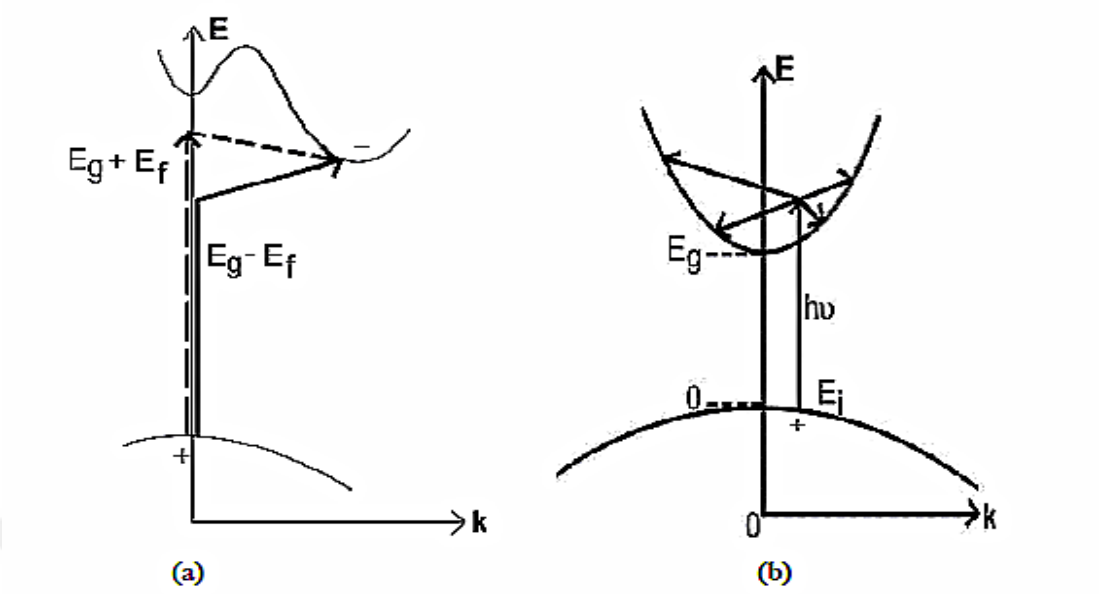
$$n_o \alpha h\nu \approx \left(h\nu - E_g\right)^n \tag{2.33}$$

ile verilir. Burada n bir sabit ve n_0 ise kırılma indisidir. Bu denklemde n izinli direkt geçişler için 1/2, izinsiz direkt geçişler için 3/2 değerini alır (Pankove, 1971).

2.1.3.3. İndirekt Bant Geçişi

İndirekt bant geçişi direkt bant geçişinin tam tersidir. İndirekt bant geçişinde yarıiletken materyalde iletim bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu enerji-momentum uzayında $\vec{k}$ değerine karşılık gelmiyorlarsa $\left(\Delta\vec{k} \neq 0\right)$ bu tür bantlara indirekt bant denilmektedir (Şekil 2.6). Bantlar arası geçişlere ise indirekt bant geçişi adı verilir. Bant geçişleri sırasında enerji korunur, fakat momentumun korunumu için fononun yayınlanması veya soğurulması gereklidir. Bu iki geçiş,

$$h\nu_{yay} = E_{son} - E_{ilk} + E_f \rightarrow \text{fonon yayınımı için} \tag{2.34}$$



Şekil 2.6. a) Bir yarı iletkende indirekt vadiler arası indirekt bant geçişi b) Direkt bantlarda bir E_{ilk} ilk enerji seviyesinden iletim bandına mümkün indirekt bant geçişlerinden dördü (Pankove, 1971);

$$h\nu_{soğ} = E_{son} - E_{ilk} - E_f \rightarrow \text{fonon soğurulması için} \tag{2.35}$$

ile verilir. Burada $E_{f,}$ fonon enerjisidir. Fonon soğurmalı geçiş için soğurma katsayısı ($h\nu > E_g - E_f$),

$$\alpha_{soğ}(h\nu) = \frac{A\left(h\nu - E_g - E_f\right)^n}{\exp\left(\frac{E_f}{k_B T}\right) - 1} \tag{2.36}$$

ile verilir. Fonon yayınımlı geçişler için soğurma katsayısı ($h\nu > E_g + E_f$),

$$\alpha_{yay}(h\nu) \approx \frac{A\left(h\nu - E_g + E_f\right)^n}{1 - \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right)} \tag{2.37}$$

ile verilir. Burada, indirekt bantlar arası indirekt geçişler (Şekil 2.6.a) için n = 2, direkt bantlar arası indirekt geçişler (Şekil 2.6.b) için n = 3 alınır. Hem fonon yayınımı hem de fonon soğurulması olması durumunda soğurma katsayısı α ile frekans ν arasındaki bağıntı,

$$n_0\alpha h\nu \approx \frac{\left(h\nu - E_g - E_f\right)^n}{\exp\left(\frac{E_f}{k_BT}\right)-1} + \frac{\left(h\nu - E_g + E_f\right)^n}{1-\exp\left(-\frac{E_f}{k_BT}\right)} \tag{2.38}$$

ile verilir. Burada n, izinli indirekt geçişler için 2, yasaklı indirekt geçişler için 3 değerlerini alabilen bir sabittir (Pankove, 1971).

2.1.4. Kırılma indisi ve Dielektrik sabiti

Bilindiği gibi direkt bant geçişinde soğurma katsayısı ile fotonun enerjisi arasındaki bağıntı,

$$n_o\alpha h\nu \approx A\left(h\nu - E_g\right)^n \tag{2.33}$$

şeklindedir. Burada n bir sabit ve n_0 ise kırılma indisidir. Bu denklemde n izinli direkt geçişler için ½ değerini alır.

$$\alpha h\nu = A\sqrt{h\nu - E_g} \tag{2.39}$$

Burada, A burada geçirliğe ilişkin karakteristik bir katsayı olup, foton enerjisinden bağımsızdır. E_g ise yasak bant aralığının enerjisini temsil eder. Eşitlikteki α ise

soğrulma katsayısını temsil eder. Soğurma katsayısında ise α=-lnT/x ile hesaplanabilinir. Burdaki x ve T sırasıyla ise film kalınlığını ve geçirgenliği gösterir.

Kırılma indeksi, n önemli bir parametre olup, entegre optiksel aygıtlar için önemli parametrelerden biridir. Bu indeks aşağıdaki eşitlik ile kolaylıkla hesaplanabilinir.

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \tag{2.40}$$

Bu eşitlikte, R saçılmayı temsil ederken, k sönüm katsayısını ifade etmektedir. Sönüm katsayısı k ise;

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \tag{2.41}$$

şeklinde tanımlanabilir. Hesaplanan n ve k değerleri bilindiği gibi malzemelerin dielektrik katsayısı ile doğru orantılıdır. Dielektrik katsayısı ile malzemenin n ve k değerleri aşağıdaki eşitliklerle ile birbirine bağlıdır.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \tag{2.42}$$

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad \text{ve} \quad \varepsilon_2 = 2nk \tag{2.43}$$

Dielektrik katsayıları, madde üstüne etkiyen elektromanyetik radyasyonuna maddenin lineer tepkisinin ölçüsünü tespit etmek için kullanılır. Verilen eşitlikteki ε_1 ve ε_2 maddelerin dielektrik katsayılarının reel ve imajiner kısımlarını temsil etmektedir. İmajiner kısım malzemelerdeki serbest elektronların soğrulmaya katkısını temsil eder. Bilindiği gibi malzemelerin dielektrik katsayıları polarizibilite ile orantılıdır. Dielektrik katsayısının imajiner ve reel kısımları malzemelerin yasak band aralığındaki durum yoğunluklarıyla doğru orantılıdır.

Malzemelerin optiksel iletkenlikleri kırılma indisi, soğrulma katsayısına aşağıdaki eşitlik ile sıkı skıya bağlıdır.

$$\sigma = \alpha nc / 4\pi \tag{2.44}$$

Bu eşitlikte c ışığın vakumdaki hızıdır.

2.1.5. Çinko Oksit (ZnO) Bileşiğinin Özellikleri

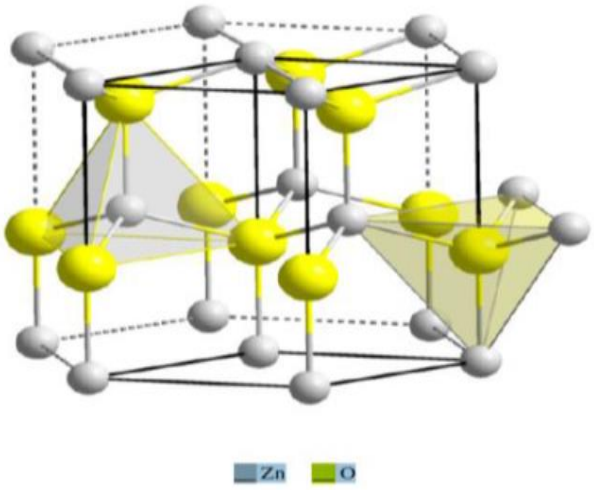
Alman kimyager Cramer Cadmia'nın, 18. yüzyılın ortalarında metal çinkonun yansımasından ısı ve ışık veren oksitlenme elde edildiğini keşfetmiştir. 1781'de Courtois Fransa'da beyaz çinkoyu üretmiş ancak belli bir süre sanayide kullanılmamıştır. Toksit madde içermemesi, sülfür gazından etkilenmemesi ve iyi bir şekilde muhafaza edilmesi sebebiyle kurşun oksit yerine tercih edilmiştir (Encylopedia of Chemical Technology, 1998).

Çeşitli bilimsel alanlarlarda çinko oksit çok yönlü olarak kullanılmıştır. Çinko oksit bileşiğiyle hazırlanan filmler yüksek elektriksel iletkenliğe ve optik geçirgenliğe sahip olmakla beraber görünür bölgedeki yansımalarından dolayı, metal oksit yarıiletkenleri arasında en çok tercih edilen materyallerdir (Grigoriev ve ark., 1997).

ZnO genelde beyaz toz halinde görünen inorganik bir bileşiktir. Çinko (Zn) periyodik tablonun II. grubunda, oksijen (O) ise VI. grubundadır. ZnO, geniş band aralığı, yüksek geçirgenliği ve elektron mobilitesi, oda sıcaklığındaki güçlü lüminesans özelliğine sahip olup bu özellikler mühendislik uygulamalarda enerji depolama özelliği ile ısı koruyucu pencerelerde kullanılmaktadır.

2.1.6. ZnO Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Çinko oksit bileşiği, Zn (çinko) ve O (oksijen) elementlerinden oluşan, hegzagonal wurtzite kristal yapıya sahip olan bir yarıiletkendir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi ZnO aslında çinko atomlarının tetrahedral kısımların yarısını işgal ettiği ve bütün oktahedral kısımlarının boş olduğu nispeten açık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bu bölgeler doldurulmazk için elverişlidir. Çinko atomlarının ara bölgelere girmesi, oksijen boşluklarına ve bant aralığı içinde verici (donor) seviyelerinin oluşmasına sebep olurken, çinko boşlukları, ara bölgelere girmiş oksijen atomları, örgüde çinkonun olması gereken yerde oksijenin olması ise alıcı (akseptör) seviyelerinin oluşmasına yol açar (Schmindt ve ark., 2007).



Şekil 2.7. Çinko Oksit (ZnO)'in birim hücresi

ZnO' in fiziksel özelliklerini inceleyecek olursak; görünür bölgede yüksek saydamlığa sahip olmakla beraber iyi ışık yakalama karakteristiği ve yeterli miktarda düşük dirence sahip materyal özellikle fotovoltaikler için önemli materyaldir. Güneş pillerinde, lazer diyotlarda ve LED' lerde, yüksek hızlı cihazlarda, fotonik araştırmalarda, optoelektronik, nanoteknoloji ve biyotıp alanında, uzay elektroniğinde, yarıiletken çok katmanlı cihazlarda, fototermal dönüşüm sistemlerinde, gaz sensörlerinde ve birçok alanda geniş kullanım alanına sahiptir. ZnO' nun bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. ZnO' nun fiziksel özellikleri

Örgü Yapısı	Hegzagonal Wurtzite
Örgü Sabiti	a=3.24Å, c=5.13 Å c/a=1.60
Molekül ağırlığı	Zn=65.38gr, O=16gr, ZnO=81.38gr
Yoğunluğu	5.66gr/cm³
Erime noktası	1975 C°
Yasak enerji aralığı	3.436 eV (0 K°), 3.20 eV (300 K°)
Eksiton bağlanma enerjisi	60 meV
Elektron mobilitesi	200 cm²/Vs (300 K)
Elektron etkin kütlesi	0,24m
Hol mobilitesi	5-50 cm²/Vs (300 K)
Hol etkin kütlesi	0,59m
Örgü enerjisi	965Kcal/mol

1980' den beri kullanılan yarıiletken malzeme ZnO; geniş bant aralığına sahip olmakla beraber, doğada bol bulunması sebebiyle maliyeti düşüktür ve ayrıca Uv bölgesinde yüksek optik geçirgenliğine, iyi ısı, ışık ve elektrik iletkenliğine sahip katı sert bir yarıiletken malzemedir. Hegzagonal wurtzide yapıda olan ZnO' in yapısal, optiksel ve elektriksel özellikleri ısıl işlemle veya katkı yapılarak değiştirilebilir. Farklı alanlarda yapılan birçok araştırmalardaki uygulamalara yönelik, farklı geometrilerde ZnO partikülleri ve filmleri elde edilmiştir (Göktaş ve ark., 2013). Literatürde yapılan bazı çalışmaları incelersek katkılı ve katskısız ZnO ince filmlerinin elektriksel, optiksel ve çeşitli yapısal özellikleri incelenmiştir. Örneğin, Sol-jel yöntemi ile cam altlıklar üzerine Al katkılı yüksek optik geçirgenliğine sahip ZnO ince filmler üretmiş, üretilen filmlerin en az $5x10^{-3}$ Ωm elektriksel dirence sahip

olduklarını rapor edilmiştir (Schuler ve ark., 1999). Diğer bir çalışmada ise, ZnO ince filmlerine farklı oranlarda bakır ve kalay katkılanmasıyla oluşan filmlerin XRD incelemelerinde numunelerin çoklu kristal yapıda olduğu ve yalnızca ZnO yapısına ait olduğu gözlenmiştir. İnce filmlerin yüzey pürüzlüğünün ve tane boyutlarının yapılan katkı ve uygulanan işlemle artığı saptanmıştır. Filmlerin optik geçirgenliği incelendiğinde ise UV bölgede düşük, görünür bölgede yüksek geçirgenlik görülmüştür (Polat, 2009). Bu şekilde birçok bilimsel çalımada ZnO' in özellikleri incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

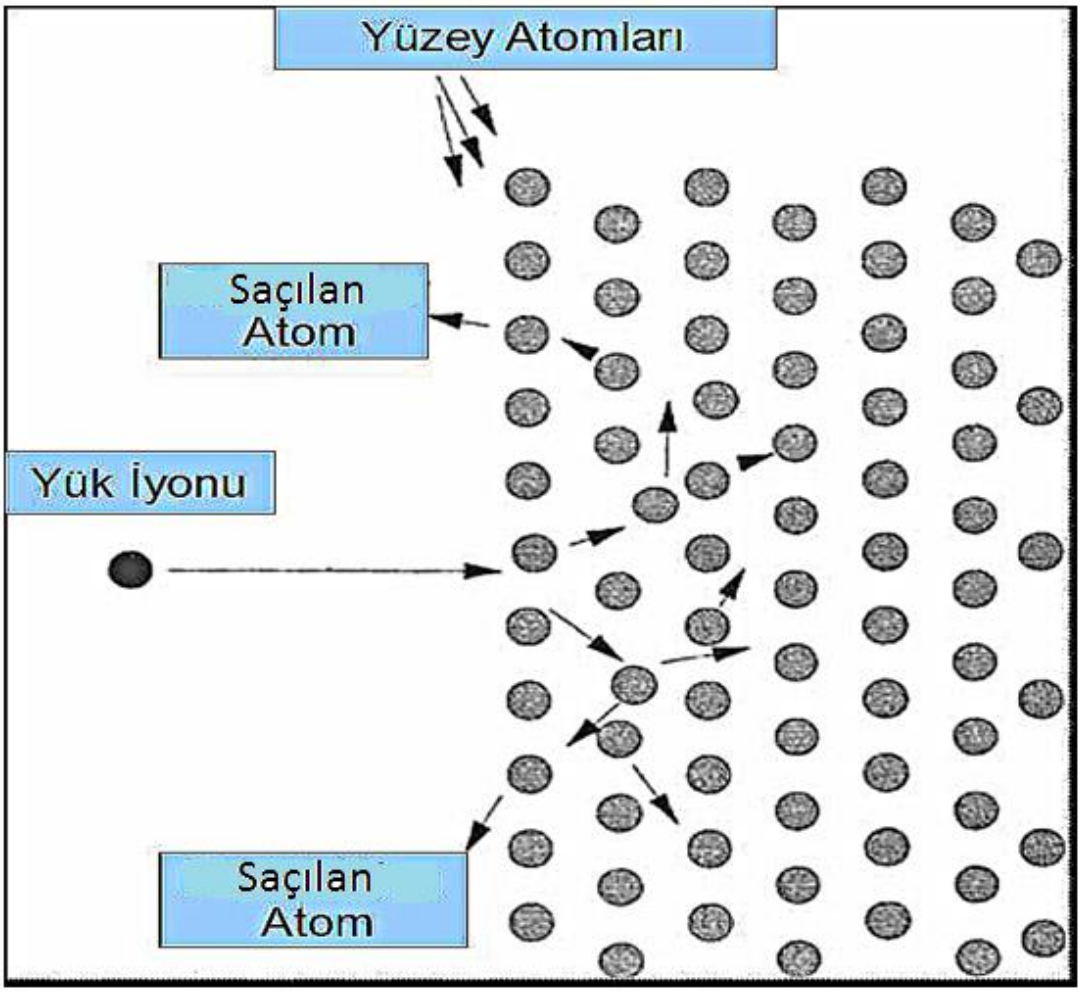
3.1. Radyo Frekans Magnetron Saçtırma Tekniği

RF Magnetron saçtırma tekniği, ilk kez 1852 yılında W.R. Grove tarafından keşfedildi. Bu teknik fiziksel bir buharlandırma olup, ince filmlerin depolanmasında kullanılmaktadır. Saçtırma kavramı kısaca, hedef malzemeden (katot) materyal koparıp, alttaş üstüne (anot) depolanmasıdır. Hedef malzeme (target), depolanması istenen materyal kaynağıdır (Behrısh, 1981). Alt taşlar vakum çemberinin içerisine yerleştirildikten sonra, vakum çemberi belirli bir basınca kadar pompalanarak, film depolama işlemi için hazırlanır. Düşük basınçlarda, asal gaz (Ar v.b) vakum çemberine gönderilir. Saçtırma, hedef malzemesine negatif voltaj uygulanarak plazma oluşturduğu anda başlar. Plazmadaki, Ar gazı uygulanan yüksek elektrik alan sayesinde iyonlaşmış haldedir. Bu pozitif yüklü iyonlar, negatif yüklü hedef materyal üzerine yüksek enerjilerle (10-100 eV) çarpıtırılarak, hedef materyalden atomik boyutta parçacıklar koparılır. Bu parçacıklar, alttaş yüzeyinde ince film olarak depolanır (Göktaş, 2013).

Saçtırma, yarı iletkenler endüstrüsünde bileşik devrelerde kullanılmak üzere, çeşitli ince film materyallerinin üretilmesinde, yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu teknik opto-elektronik uygulamalar için, cam üstüne yansıtıcı olmayan katmanların üretilmesinde de kullanılmaktadır. Bu metot, oda sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda film üretmeye müsait olduğundan, ince-film transistörler için metal kontakların üretilmesinde de kullanılabilir. Buna ilave olarak, bu teknik aynı zamanda ince film dedektörler, güneş pilleri ve metalleri arası ince bağlantıların hazırlanmasına da olanak verir (Mınamı, 1984).

İlk ZnO araştırmalarında kullanılan en popüler büyütme yöntemlerinden birisi saçtırma yöntemidir (DC Saçtırma, RF Magnetron Saçtırma ve Reaktif Saçtırma). Magnetron saçtırma, sol-gel ve kimyasal buhar depolama yöntemleriyle kıyaslandığında, düşük maliyeti, basitliği ve düşük işlem sıcaklığı nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. ZnO filmler, rf magnetron saçtırma yöntemi kullanılarak

yüksek saflıktaki bir ZnO hedefinden saçtırmayla belirli alt tabakalar üzerinde büyütülürler. Büyütme işlemi, genellikle büyütme ortamındaki O_2/Ar+O_2 oranının 0' dan 1' e değiştiği $10^{-3} - 10^{-2}$ Torr basıncında gerçekleştirilir. O_2 reaktif gaz olarak ve Ar da saçtırma gazı olarak kullanılır. ZnO filmler aynı zamanda Ar+O_2 karışımında bir Zn hedefinden dc saçtırmayle de büyütülebilirler. Plazmaya uygulanan rf gücü, ZnO hedefinden elde edilen saçtırma ürün oranını düzenlemek için ayarlanır. Bu deneylerde hedef, gerçek depolama başlamadan önce hedef yüzeyinin üzerindeki kirliliği çıkarmak, sistemi kararlı yapmak ve en iyi şartlara ulaşmak için 5-10 dakika civarında ön saçtırma işlemine tabi tutulur. İlk saçtırma malzemelerinin çoğunun polikristal hatta amorf olmasına rağmen bazı önemli başarılar raporlanmıştır (Özgür ve ark., 2005).

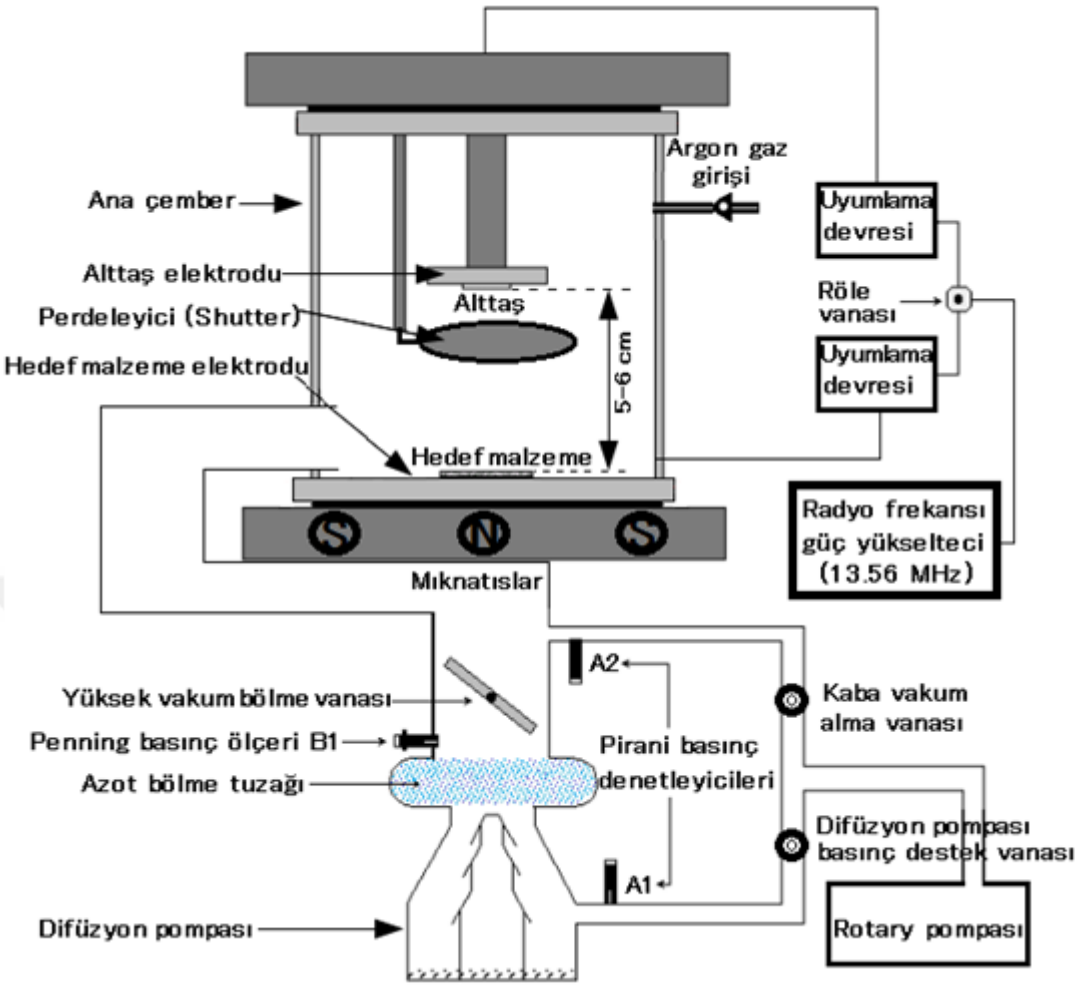


Şekil 3.1. Fiziksel saçtırma sürecinin şematik gösterimi

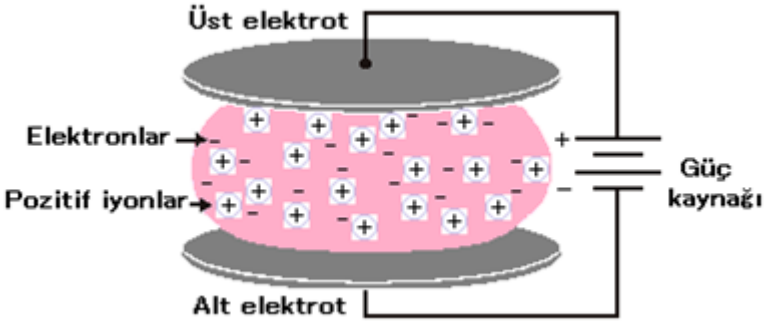
DC veya RF mod olmak üzere iki türlü magnetron saçtırma tekniği bulunmaktadır. Bu çalışmada $Zn_{1-x}A_xO$ (A=*Fe, Mn ve Co)* ince filmlerini, RF modunda hazırlandığından bu teknik üzerinde durulacaktır. DC tekniği genelde iletken malzemelerde kullanılır. Bu nedenle eğer hedef malzeme (target) iletken değilse, materyal üzerinde pozitif yük oluşacak ve sonuç olarak saçtırma duracaktır. RF saçtırma tekniği ise, iletken ve yalıtkan materyallerde kullanılmaktadır. Burada, magnetler, iyonlaşma olayı sonucu oluşan elektronların yüzdesini, dolayısıyla Ar atomlarıyla olan çarpışmalarını artırmak ve başka nedenlerden dolayı kullanılmaktadır.

Kullandığımız magnetron saçtırma sistemi (Şekil 3.2) görülmektedir. Burada rotari pompası (mekanik pompa), ana çemberin basıncını ve difüzyon pompasının çalışabilmesi için (~10^{-2} torr) gerekli ön basınçları sağlar. Difüzyon pompasının çalışabilmesi için, gerekli ön basınç ayarlandıktan sonra çalıştırılır. Difüzyon pompası, mekanik pompaya göre daha düşük basınçlar (~10^{-5} torr) sağlar. Difüzyon pompasının üst kısmına azot bölme tuzağı kurularak daha da düşük basınçlar elde edilebilir. Difüzyon pompası, magnetler ve elektrotlarda meydana gelen ısılar, sistem içerisine önceden kurulmuş su düzeneği ile soğutulur.

Film depolanması, ana çember içinde plazma oluştuğu andan sonra başlar. Plazma, düşük basınçtaki Ar gazının uygulanan yüksek gerilim (elektriksel alan) sayesinde iyonize edilmesiyle, çok sayıda pozitif ve negatif iyonlar (elektron) bir arada oluşturularak elde edilir (Şekil 3.3). Plazmanın sürekliliğini koruması, hızlandırılan elektronların nötr Ar iyonları ile çarpışmaları ve yeni iyonlaşmalara sebep olmalarıyla sağlanılır. Bir yüzeye çarpan hızlandırılmış elektronlar, iyonlar ve fotonlar çıkartır. İşte bu elektronlara ikincil elektronlar adı verilmektedir. Bunlar, yolları boyunca nötr atomları iyonize eder veya iyonlarla tekrar birleşerek nötr atomlar oluştururlar. Bu olaylar dizisinin devamı plazmanın sürekliliğini önemle etkilemektedir.

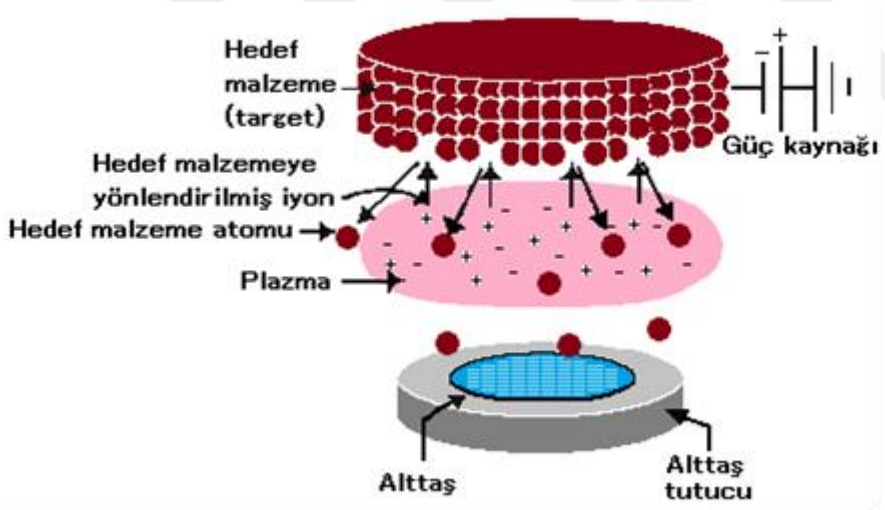


Şekil 3.2. Magnetron saçtırma sisteminin şematiği (Göktaş, 2013)



Şekil 3.3. Ana çemberde plazma oluşma durumu (Göktaş, 2013)

Şekil 3.4' de ise hedef malzemenin ne şekilde alttaş üstüne yönlendirildiği görülmektedir. Çok yüksek enerjili hıza sahip olan plazmadaki iyonlar, hedef malzeme üzerine (anoda) yönlendirilerek hedef malzemeden atomların koparılmasını ve bu koparılan atomların alttaş üzerine depolanmasını sağlarlar. Anot, iyonlar dışında elektronlar ve fotonlarla da bombardıman edilmektedir. Bunların çoğu plazmadan gelmekle birlikte, çok hızlı elektronlar plazmayla etkileşmeden önce katoddan hızlanarak gelmektedir. Yüksek hızlı elektronlar depolanmakta olan filmi tekrar püskürttüğü (resputtering effect) için anotta önemli bir etkiye sahiptirler. Anotta ikincil elektronlar hızlanarak tekrar plazmaya giderler ve plazmada bulunan iyonları hızlandırarak anot veya alttaş üzerine gönderirler. Bu da depolanmakta olan film üzerine ikinci bir saçtırma (resputtering) olayına sebep olur (Tepe ve ark., 2007).



Şekil 3.4. Ana çemberde filmin depolanması (Göktaş, 2013)

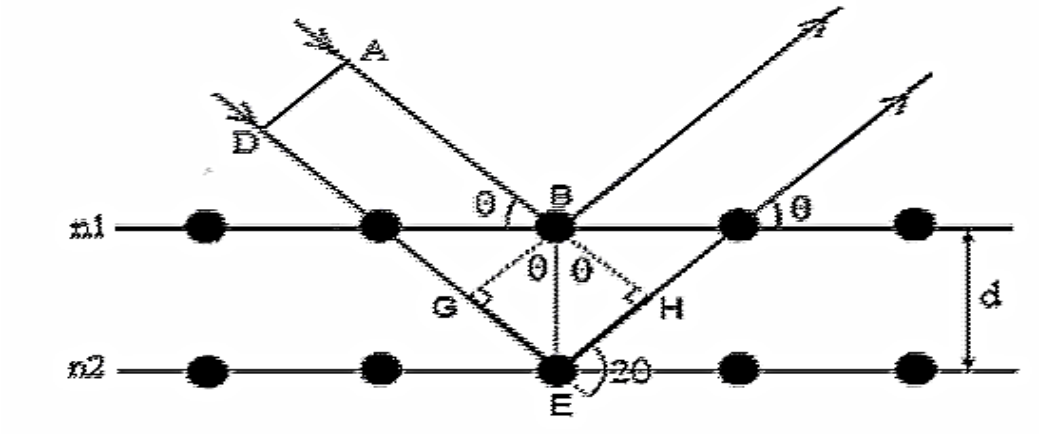
Termal buharlandırma tekniğine kıyasla, Bu tekniğin avantajları; daha yüksek enerjili atomlar, alttaş yüzeyine daha iyi yapışma, daha düşük vakum alanı, daha çok çarpışma (elektronlar ile Ar atomları arasında), filmde daha küçük tane boyutları ve birçok yönlenilmiş tane bölgeleri olarak sayılabilir. Bu tezdeki tüm ince filmler magnetron saçtırma tekniğiyle Japonya'nın Shimane Üniversitesinde üretilmiştir.

3.2. X-ışını kırınımı analizi (XRD)

X-ışınlarının kristaller aracılığıyla kırınımı ilk olarak 1912' de Alman fizikçi Von Laue tarafından keşfedilmiştir. Laue' nin yaptığı deneyler x-ışınlarının dalga karakterini ve atomların kristal içerisinde periyodik düzende olduğunu ispatlamıştır. Bu deneylere dayanarak ingiliz fizikçi W.L. Bragg yine 1912 yılında Laue deneyini başarılı bir şekilde analiz etmiş ve kırınım kullanılan koşulları daha basit bir formda ifade etmiştir.

Kırınıma uğraması için gönderilen x-ışınları kristaldeki atomlara ait elektronlar aynı frekansta titreşmeye zorlanırlar. Bu durumda, kristaldeki elektronlar her yönde aynı dalga boyunda ışın yayarlar. Bu ışımalar bazı yönlerde birbirlerini kuvvetlendirirken diğer yönden zayıflatırlar. Yani ışımalar yapıcı ve yıkıcı ışımalar yapar.

Kırınım olayını açıklayan Bragg, Şekil 3.5' de gösterildiği gibi kristaldeki atomların oluşturduğu farklı düzlem tabakalarından yansıyan dalgaların girişimleri sonucu oluşur. Yansıma düzlemleri kristalin yüzeyini oluşturan düzlemlerden tamamen farklı olabilir. Kristalin paralel düzlemlerine θ açısı yaparak gelen tek dalgaboylu x-ışınlarının kırılmadığı kabul edilirse, kristale giren x-ışınları düzlemlerden θ açısı yaparak yansıyacaktır. Bu ışınlar yol farkından dolayı birbirlerini yapıcı veya yıkıcı yönde etkilerler. Girişim yapıcı ise A ve D nolu ışınlar arasındaki yol farkı, dalgaboylarının tam katlarına eşit olmalıdır.



Şekil 3.5. X-ışınlarının kristal tarafından kırınıma uğratılması

Yol Farkı $= \overline{GE} + \overline{EH} = d\sin\theta + d\sin\theta$ ile verilir. Buradan,

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{3.1}$$

yol farkının dalgaboyunun tam katlarına eşit olması gerektiği görülür. Bu eşitlik Bragg yasası olarak bilinir. Burada, d kristal düzlemleri arası uzaklığı, n bir tam sayı olmak üzere yansıma mertebesini, λ ise ışının dalgaboyunu göstermektedir (Göktaş ve ark., 2013). Bu çalışmada üretilen ince filmlerin x-ışını kırınım analizi, Rigaku Ultima III (CuKα, 40 kV, 40 mA, 1.54 Aº, Harran üniversitesi merkezi lab.) difraktometresi kullanılarak numunelerin x-ışını kırınım analiz spektrumu elde edildi.

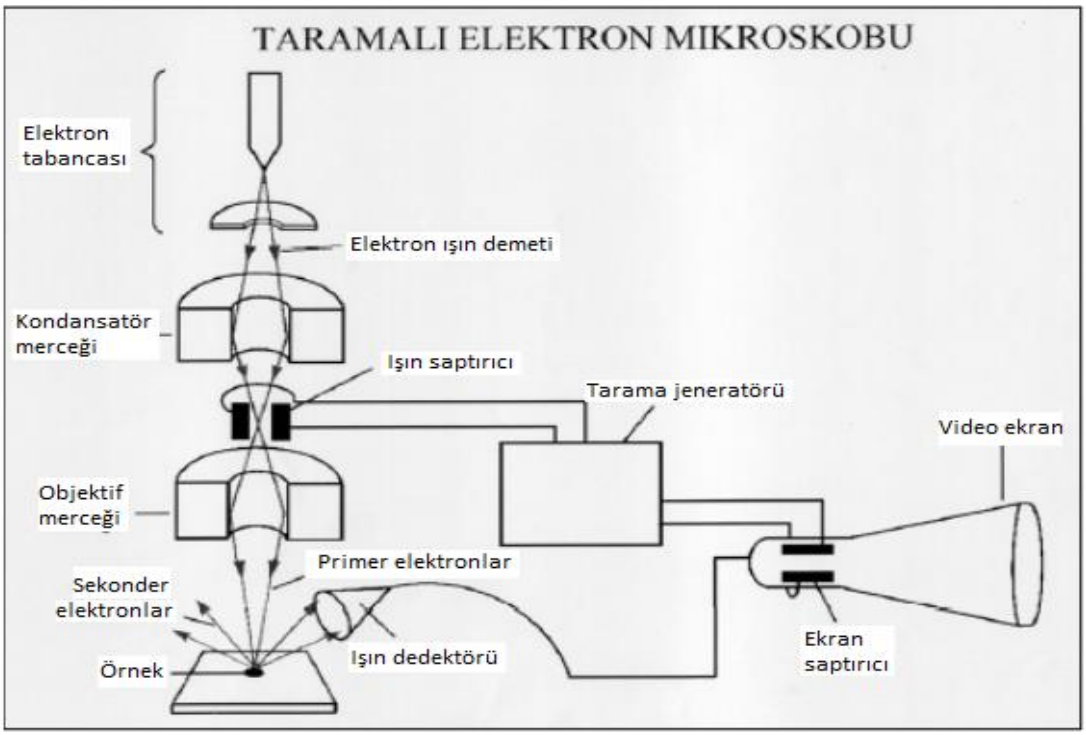
3.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Taramalı elektron mikroskopu incelenecek olan yapıya zarar vermeden, incelenecek olan yüzey ve materyallerin morfolojik yapılarıyla birlikte bileşimleri hakkında bilgi veren önemli ve çok amaçlı bir tekniktir. SEM' de termo iyonik yayıcı kaynak kullanılır. Termo iyonik kaynağın dezavantajları, düşük parlaklık, katot materyalinin buharlaşması ve operasyon sırasında ısı değişimi şeklindedir. SEM tekniği, yüksek elektron demetiyle numunenin taranması sonucu numune yüzeyinden 3 boyutlu görüntü alabilmektedir.

SEM görüntü alma tekniğini incelersek; Tungsten (W) veya Lantanyum Hekzaborid (LaB_6) gibi maddelerden üretilen katottan elektronlar, anota doğru hızlandırılır. Tungsten elementi erime noktası en yüksek ve buharlaşma basıncı en düşük seviyede olduğu için ısıtmaya el verişli elektron yayma sistemidir. Elektron demeti lensler aracılığıyla uygun boyutlu alanlara odaklanır. Elektron demeti, görüntü merceklerinde bulunan çift tarama kanallarından geçerek örnek yüzeydeki dikdörtgen biçimindeki alan üzerinde dijital görüntüye çevrilir (Şekil 3.6). Saçılma olaylarında primer elektron demeti taranan yüzey içinde etkin bir şekilde yayılır ve yüzey bölgesindeki etkileşimler, sonraki elektronların yayılmasına sebep olarak yeni görüntüler elde edilmesini sağlar.

Bu çalışmada magnetron saçtırma yöntemiyle üretilen filmlerin yüzey yapılarını incelemek için Harran Üniversitesindeki Zeiss Evo 55 SEM kullanılmıştır.

SEM ayrıca enerji dağılımlı x-ışını analizi (EDX, EDS) ile donatılmıştır. Bu x-ışını analizi ince film veya diğer tür numulerdeki elementlerin yüzdelik oranlarını öğrenmeye yöneliktir. SEM bu analiz biçimini uygularken, numune üzerine düşen elektron demetleri sonucu, elektronlar numune yüzeyindeki atomlardan koparılarak atom yörüngesinde boşluğa sebep olur. Oluşan elektron boşluğu bir üst yörüngedeki elektronlar tarafından doldurulukeni aradaki bağlanma enerjisi farkından dolayı x-ışını yayınlar. Yayınlanan bu x-ışını yardımıyla numunedeki elementlerin karakteristik özelliklerine bağlı olarak birbirinden rahatlıkla ayırrt edilebilmesini sağlar. Yayınlanan enerji miktarı ile orantılı bir şekilde elementlerin oranı belirlenmiş olur. İnce filmlerin elementsel stokiyometrik oranlarını belirlemek için Harran Üniversitesindeki SEM' e bağlı Bruker AXS Microanalysis GmbH marka EDX cihazı ile 30 keV altında tüm numuneler incelenmiştir (Harran üniversitesi merkezi lab).



Şekil 3.6. Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi (Yavuz, 2012)

3.4. Ultraviyole-Görünür (UV-Vis) Spektroskopi

UV-Vis spektrofotometresi olarak da adlandırılan bu aygıt, malzeme üzerine düşmeden önceki ışık şiddeti ile (I_0), malzeme üzerine etkiyen ışığın geçtikten sonraki şiddetini (I) kıyaslar. Bu iki şiddetin birbirine göre oranı (I/I_0) geçirgenlik olarak bilinir. Genellikle $\%T$ olarak bilinir. Absorpsiyon (A) ile geçirgenlik arasındaki bağıntı,

$$A = -\log(\%T) \quad (3.2)$$

şeklindedir. Spektrometrenin temel kısımları, ışık kaynağı (görünür dalga boyları için akkor lamba veya döteryum ark lambası), numune tutucu kısım, ışığın farklı dalga boylarını birbirinden ayırt etmek için monokromatör ve dedektördür (foto diyot). Foto diyotlar, ışığı süzerek, tek dalga boyunun dedektöre ulaşmasını sağlayan monokrometreler ile kullanılırlar.

UV-Vis, oksit yarıiletkenlerin elektronik yasak enerji bant aralıklarının (E_g) hesaplanmasında kullanılabilir. Klasik bir yarıiletken, enerjisi E_g' den küçük olan fotonlar için minimum absorpsiyon gösterirken, enerjisi E_g' den büyük olan fotonlar için yüksek absorpsiyon gösterir. Bu yüzden absorpsiyon spektrometresinde, E_g enerjisine yakın enerjilerde keskin artışlar gözlenir. Bu keskin artışların görüldüğü kısım, absorpsiyon kenarı olarak bilinir. Bu çalışmada hazırlanan ince filmlerin optiksel sonuçları Harran üniversitesindeki Perkin Emler 45 UV-Vis spektro fotometresi kullanılarak geçirgenlik ve soğrulma spektrumları yapılmıştır. Yansıma spektrumları ODTÜ merlab da yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

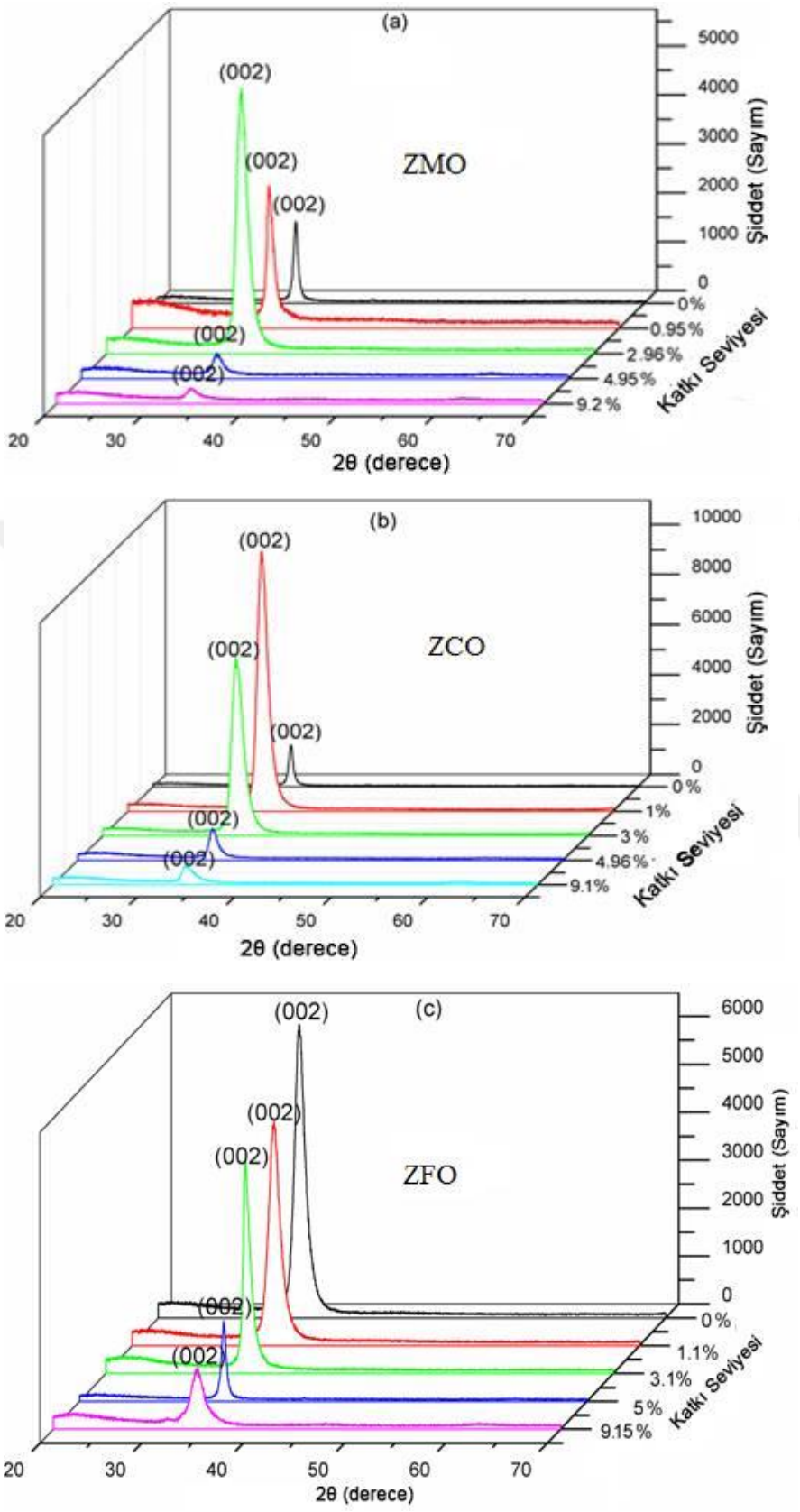
4.1. Giriş

Bu bölümde, radyo frekans magnetron saçtırma yöntemiyle farklı ortalama katkı seviyesinde (x=%1-9) hazırlanan Zn_{1-x} TM_xO (TM= Mn, Co, Fe) ince filmlerinin yapısal, optiksel ve dielektrik özelliklerini tartışmaya ve kavramaya yönelik çalışmalar sunulmuştur.

4.2. Magnetron Saçtırma Tekniğiyle Üretilen İnce Filmler

4.2.1. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerinin X-ışını Kırınımı (XRD) Sonuçları

Magnetron saçtırma tekniğiyle oda sıcaklığında üretilen $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin XRD spektumları, filmlerin c ekseni boyunca yönlenen (002) düzlemine sahip, hegzagonal würtzit ZnO yapıya ait olduğu saptanmıştır (Şekil 4.1). Farklı ortalama katkı seviyelerinde (x=%1,9) Mn, Co, Fe elemetlerinin katkı oranlarının (002) düzlemine ait pik kırınım açısı ve FHWM değerlerinin değişmesine neden olması ZnO örgüsüne Zn^{+2} iyonunun yerine Mn^{+2}, Co^{+2} ve Fe^{+2} nin başarıyla yerleştirdiğini yansıtmaktadır. Mn, Co ve Fe kristallerinin boyutu (D_{hkl}) Sherrer denklemi kullanılarak elde edilmiştir (Çizelge 4.1). ZMO, ZCO, ZFO filmleri farklı davranışlar sergilemişlerdir. Mn, Fe ve Co katkıları için, filmlerin D_{002}' si, ZFO geçiş metali katkılı filmlerdeki ortalama % 3 ve 5 oranı haricinde, ortalama geçiş metali katkı seviyelerinde doğrusal olarak düşük değerlere sahiptir. Filmlerin hesaplanan c örgü sabitlerinin, ZMO ve ZFO' da artan katkı yoğunluğuyla orantılı şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum ZnO örgü sisteminde, Mn^{+2} ($r_{Mn}{}^{+2}$=0,80 Aº) yada Fe^{+2} ($r_{Fe}{}^{+2}$=0,74 Aº)' nin iyonik çaplarının Zn^{+2} ($r_{Zn}{}^{+2}$=0,72 Aº)' dan büyük olması Mn^{+2} yada Fe^{+2}' nin Zn^{+2} iyonu ile yerdeğiştirmesinden kaynaklandığı muhtemeldir. ZCO filmleri için muhtemel Zn^{+2} ($r_{Zn}{}^{+2}$=0,72 Aº) ve Co^{+2} ($r_{Co}{}^{+2}$=0,58 Aº)' nin tetrahedral yapıda iyonik yarıçaplarındaki önemsiz bir fark yüzünden c örgü sabitinde önemli bir değişiklik yoktur.



Şekil 4.1. Magnetron saçtırma tekniği ile oda sıcaklığında cam üstüne hazırlanan $Zn_{1-x}TM_xO$ (TM= Mn, Co, Fe) ince filmlerinin XRD spektrumları

Filmlerin kristallik boyutları hesaplamak için, Scherrer bağıntısı kullanılmıştır.

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \tag{4.1}$$

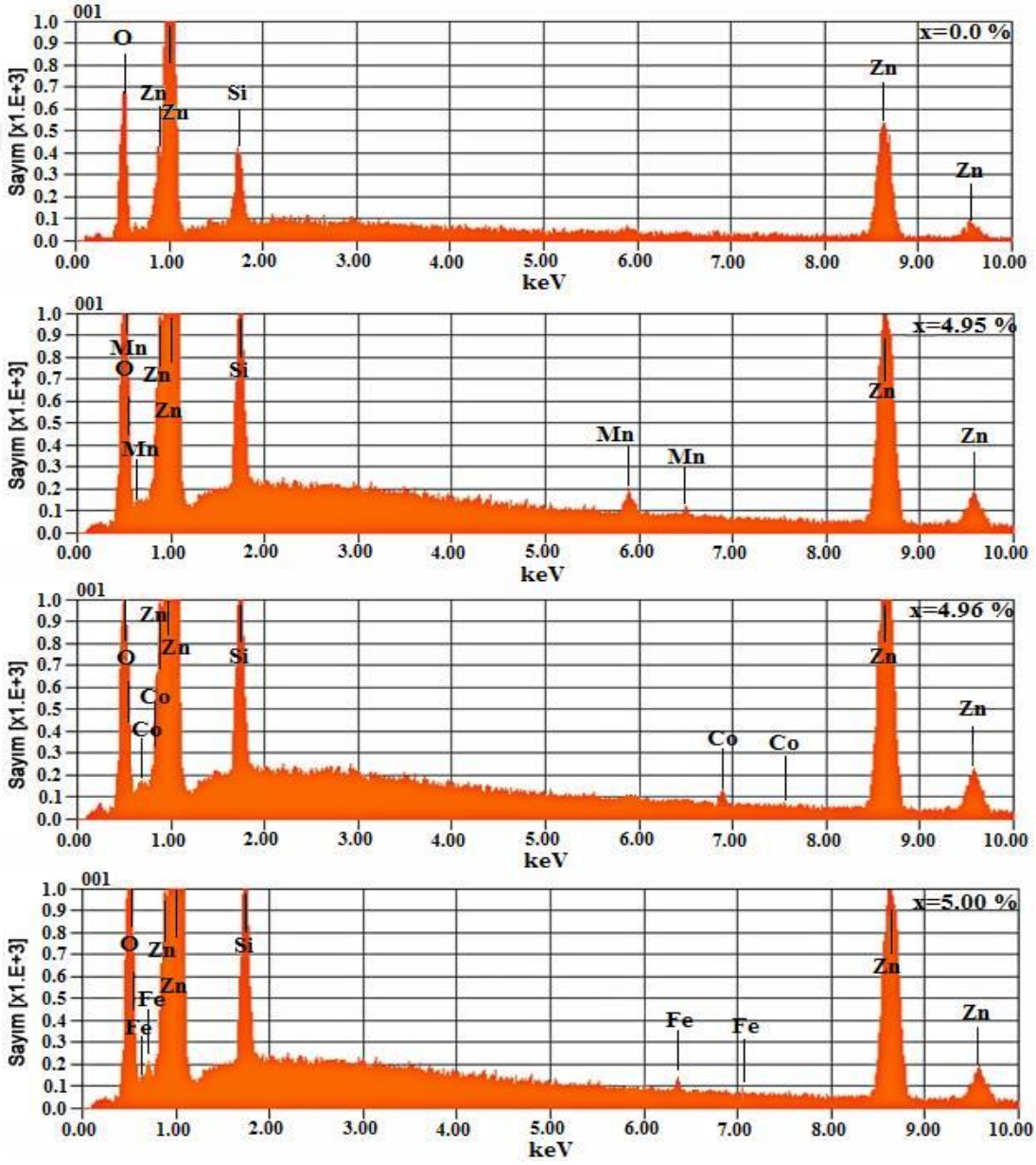
denklemde D, kristalik boyutu (K_B); λ, kullanılan x-ışını kaynağının dalga boyu (0.154 nm) β, pik şiddetinin maksimum yarı yükseklik genişliği (FHWN) k, kristallik büyüklüğü hesaplanan filmle ilgili bir sabit (0.89) ve θ, Bragg kırınım açısıdır.

Çizelge 4.1. Cam üzerine oda sıcaklığında magnetron saçtırma yöntemiyle üretilen $Zn_{1-x}TMxO$ ince filmlerin bazı yapısal ve optiksel özellikleri

Film Kalınlığı (nm)	TM türü	TM oranı (%)	FWHM (β°)	2θ(deg.)	$D(nm)_{002}$	c (nm)	E_g(eV)
73	Mn	0.0	0.50	34.20	16	5.238	3.30
88	Mn	0.95	0.75	34.04	11	5.263	3.31
105	Mn	2.96	0.94	33.82	9	5.297	3.33
108	Mn	4.95	1.37	33.80	6	5.300	3.34
115	Mn	9.20	1.65	33.78	5	5.303	3.35
80	Co	1.00	1.20	33.80	7	5.300	3.28
92	Co	3.00	1.37	33.72	6	5.312	3.26
100	Co	4.96	1.65	33.86	5	5.290	3.21
115	Co	9.10	2.10	33.72	4	5.312	3.16
76	Fe	1.10	1.14	33.92	7	5.281	3.28
87	Fe	3.10	1.03	33.85	8	5.292	3.27
102	Fe	5.00	0.69	33.74	12	5.309	3.25
115	Fe	9.15	1.60	33.72	5	5.312	3.23

4.2.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerin EDX Sonuçları

Magnetron saçtırma tekniğiyle oda sıcaklığında üretilen ZMO, ZCO ve ZFO nano yapılı ince filmlerinin kiyasal bileşimi ve sayısal atomik yüzde oranlarını kontrol etmek için %0 ve %5 ortalama geçiş metallerinin EDX analizi sonuçları verilmiştir (Şekil 4.2). Analizler Zn, Mn, Co, Fe, O ve Si 'nin varlığını doğrulamıştır (Çizelge 4.2). Silisyumun varlığı muhtemelen numune tutucu pyrex camdan dolayıdır.



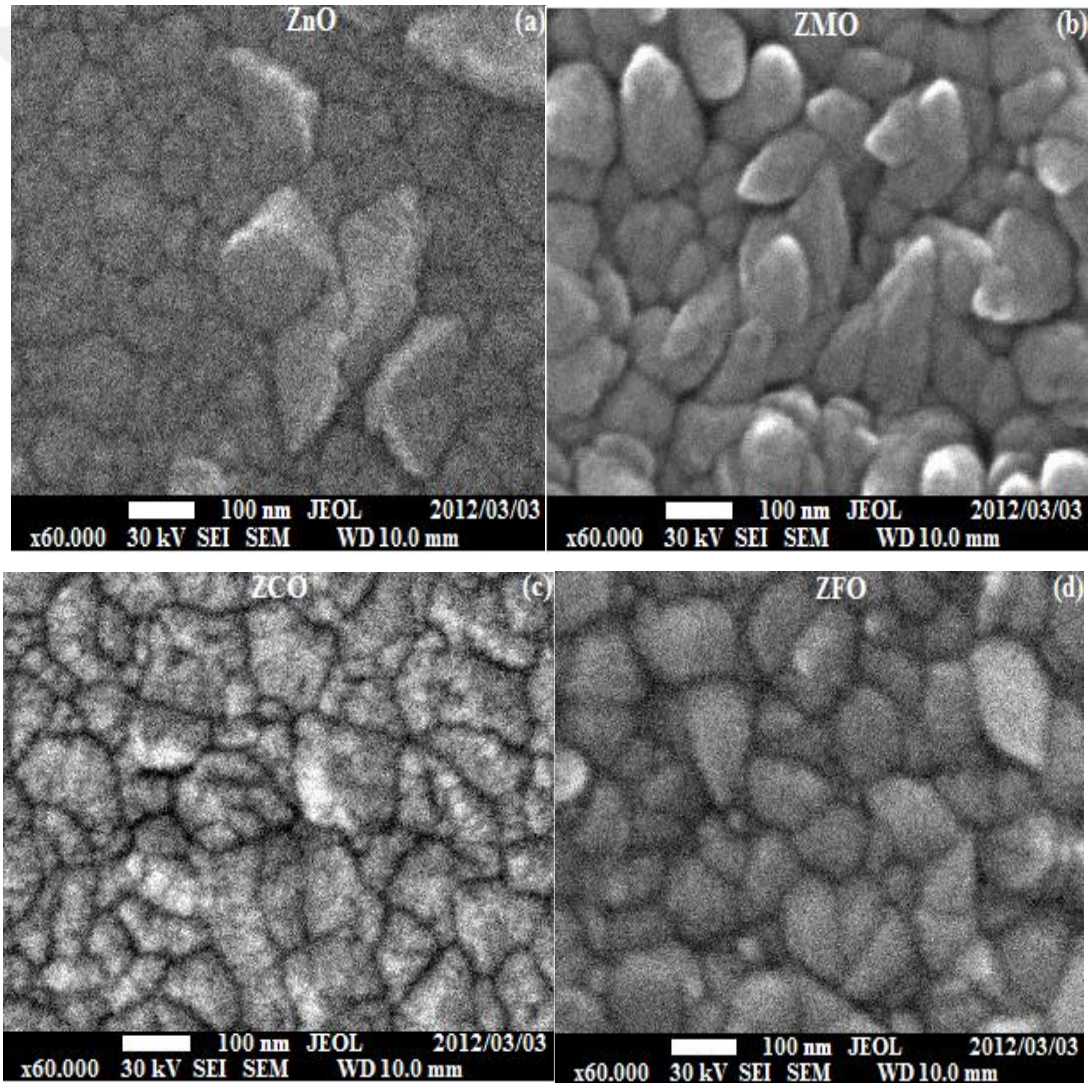
Şekil 4.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin EDX spektrumları

Çizelge 4.2. $Zn_{1-x}TM_xO$ filmlerinin EDX analiz sonuçları

Zn Oranı (%)	**Mn** Oranı (%)	**O** Oranı (%)	Toplam (%)	Spektrum serisi
92.7	0	7.3	100	K
90.81	0.95	8.69	100	K
86.65	2.96	10.39	100	K
76.63	4.95	18.42	100	K
70.36	9.20	20.44	100	K
Zn Oranı (%)	**Co** Oranı (%)	**O** Oranı (%)	Toplam (%)	Spektrum serisi
89.75	1.00	9.25	100	K
87.1	3.00	9.90	100	K
79.94	4.96	15.1	100	K
77.44	9.10	13.46	100	K
Zn Oranı (%)	**Fe** Oranı (%)	**O** Oranı (%)	Toplam (%)	Spektrum serisi
90.49	1.10	8.41	100	K
87.56	3.10	9.34	100	K
79.54	5.00	15.46	100	K
73.99	9.15	16.86	100	K

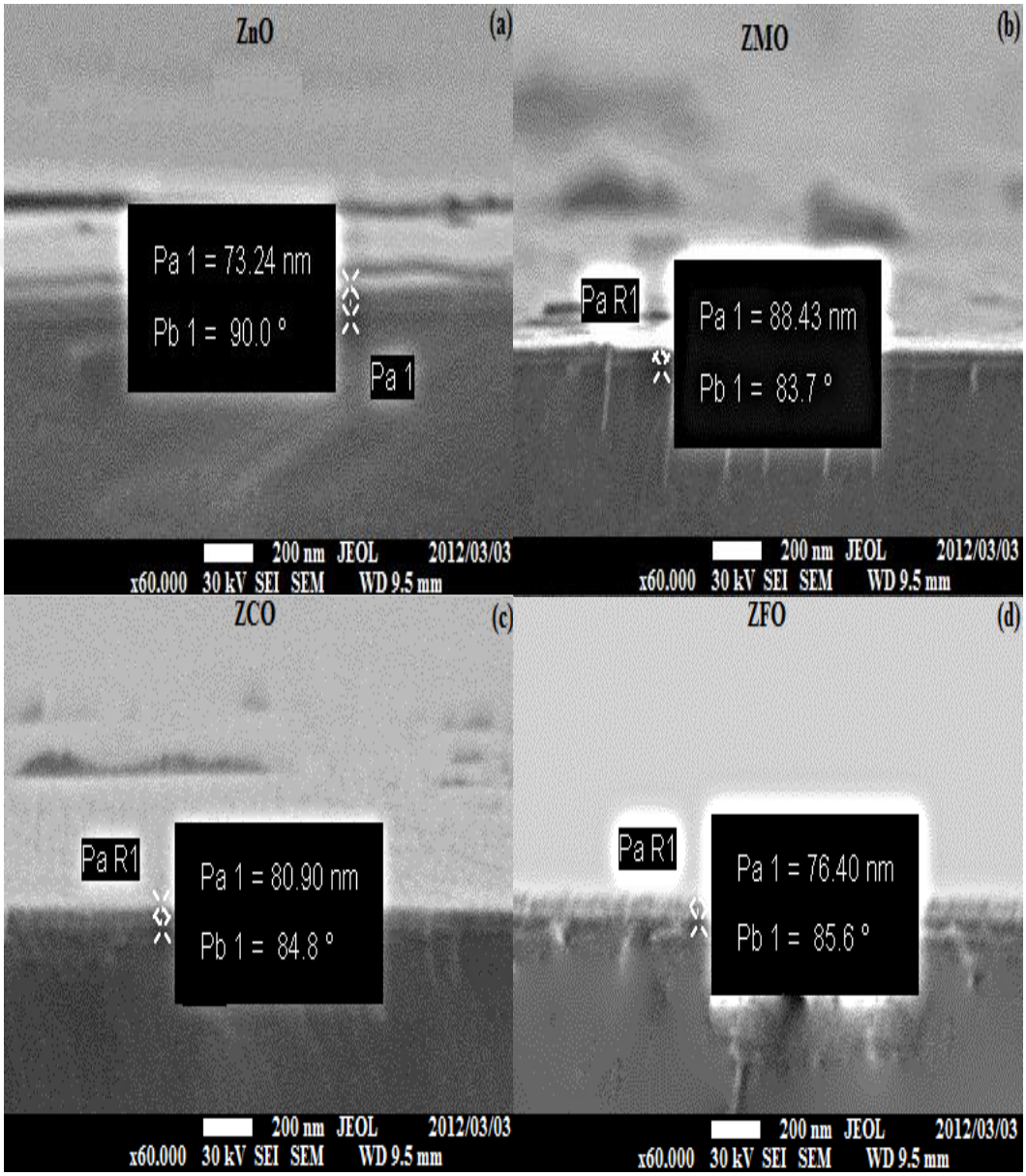
4.2.3. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM ölçüm sonuçları

$Zn_{1-x}TM_xO$ nanokristal ince filmlerinin yüzey morfolojisi ve film kalınlığı 30 keV çalışma geriliminde taramalı elektron mikroskobuyla elde edilmiştir (SEM). Üretilen ZMO, ZCO ve ZFO filmlerinin SEM yüzey görüntüleri %0 ve 1 ortalama geçiş metali katkı oranına sahip filmler için Şekil 4.3' de gösterilmiştir. Tüm filmlerin farklı şekilde tanecikli yapıya sahip olması kusursuz bir kaplamaya sahip olduğu bariz şekilde görülmektedir. Numune yüzeyleri çatlaksız, düz ve homojen bir yapıya sahiptir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM görüntüleri

Filmlerin yan kesitlerinden yapılan SEM çalışmalarından, film kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.4). SEM görüntülerindeki enine kesitte kalınlık yaklaşık olarak ZnO (%0 TM), ZMO (%0,95 Mn), ZCO (%1 Co) ve ZFO (%1,1 Fe) için sırasıyla 73, 88, 80 ve 76 nm'dir.

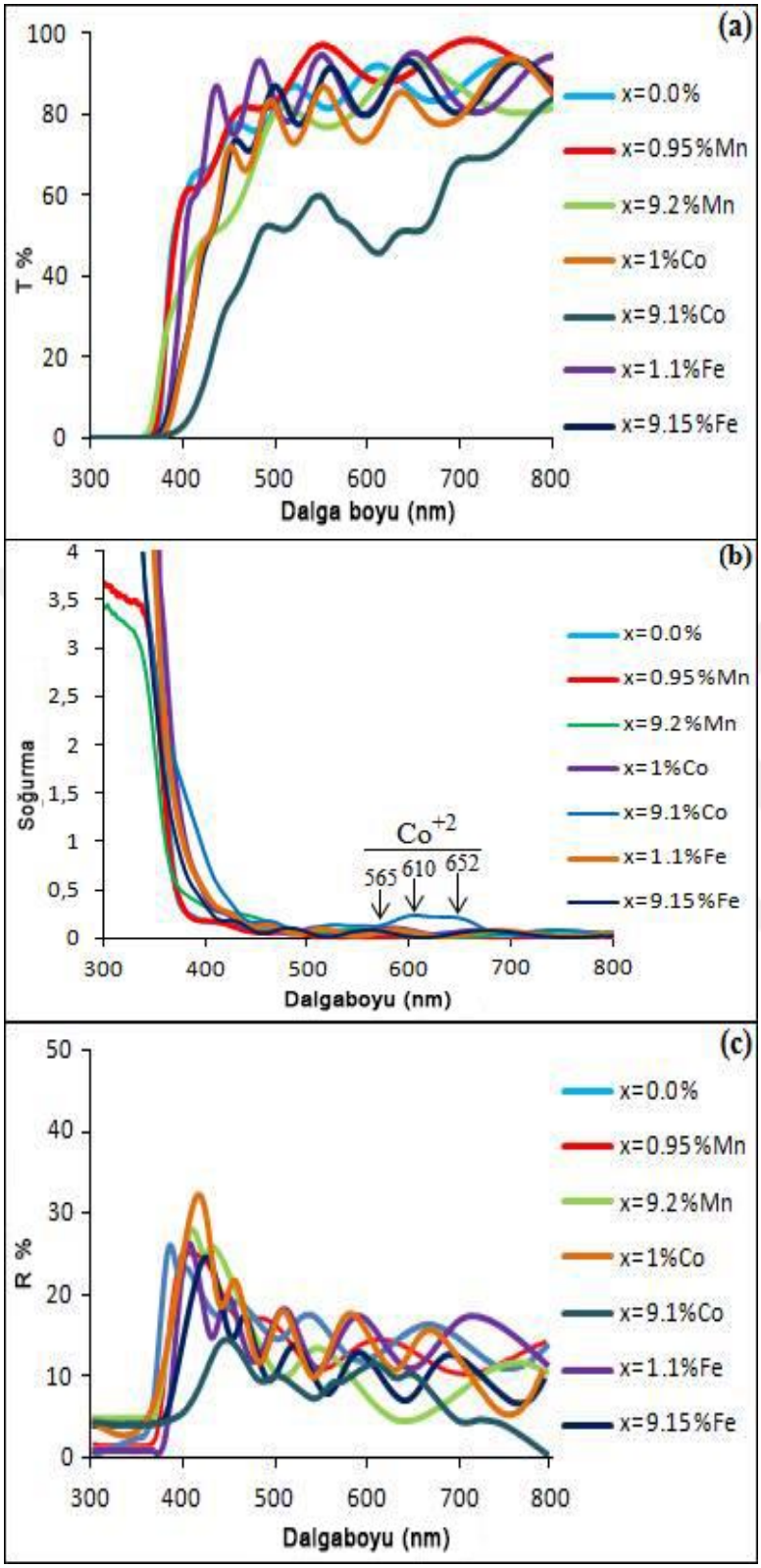


Şekil 4.4. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin SEM kalınlık görüntüleri

4.2.4. $Zn_{1-x}TM_xO$ İnce Filmlerininin Optiksel Özellikleri

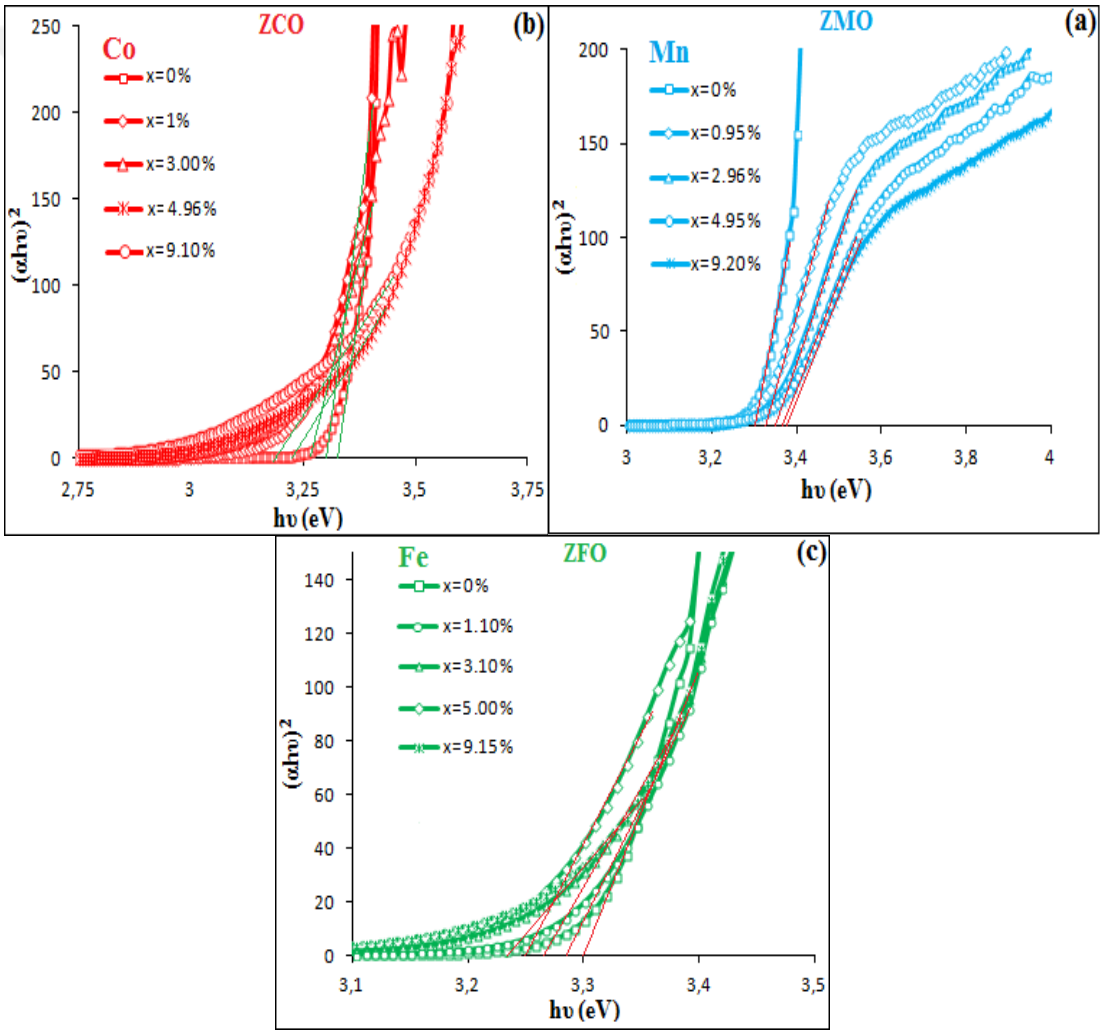
Geçiş metali katkılı ZnO nanaoyapıların 300-800 nm aralığındaki geçirgenlik, soğurma ve yansıma optik spektrumları sırasıyla Şekil 4.5.a, 4.5.b ve 4.5.c' de verilmiştir. Şekil 4.5a-c' de gösterildiği üzere spektrum yansımalarındaki girişim çizgileri magnetron saçtırma yönteminin yüksek film kalitesini yansıtmaktadır. Katkılanmamış ve %1 geçiş metali katkılı (%0,95 Mn, %1 Co ve %1,1 Fe) ZnO ince filmlerinin, saydamlığının %80 ile %95 arasında değiştiği görünür bölgede yüksek saydamlık gösterdiğine dikkat edilmelidir. ZnO filmlerle karşılaştırıldığında, geçiş metali katkılı filmler daha yüksek geçirgenliğe sahiptir, bu da ortalama geçiş metali ortalama katkı oranı %1 olan filmlerdeki bozukluklarla ilişkilendirilebilir. Bütün katkısız ve geçiş metali katkılı ZnO ince filmleri arasında, ZFO filmleri görünür bölgede, %1 ortalama katkı seviyesiyle, en yüksek geçirgenliğe sahiptir. ZnO filmlerinde farklı geçiş metali katkı seviyesinde, geçirgenlik geçiş metali artan katkı seviyesiyle birlikte düşmektedir. %9 (%9,2 Mn, %9,1 Co ve %9,2 Fe) katkı seviyeli ZMO ve ZFO filmlerine nispeten, ZCO filmleri Uv menzilinde, %65 altı civarında en küçük geçirgenliğe sahiptir (Şekil 4.5a).

Şekil 4.5b' de farklı geçiş metali katkılı ZnO filmlerinin farklı katkı seviyelerindeki soğurma spektrumu görülmektedir. Bu şekilde, geçiş metali katkı seviyesi arttıkça filmlerin soğurulmasının Uv bölgesinde arttığı görülmektedir. ZMO ve ZFO filmlerine nispeten, ZCO filmleri %9 (%9,2 Mn, %9,1 Co, %9,2 Fe) ortalama katkı seviyesi için en yüksek soğurmaya sahiptir. ZnO, ZMO, ZFO ve ZCO filmlerinin 300 K' da alınan optik yansıma spektrumu Şekil 4.5c'de gösterilmiştir. %1 Co katkılı ZnO dışındaki diğer filmlerin %30' dan az yansıtıcılığına sahip olduğu açıkca görülmektedir. Bu filmlerin farklı geçirgenlik ve soğurma özelliğine bağlıdır. Şekil 4.5c' de görüldüğü gibi, ortalama %9 geçiş metali katkılı ZnO filmleri için yansıma özelliği azaldığından dolayı geçirgenlik ve zayıf soğurmaya neden olur. Karşılaştırılmalı olarak, geçiş metali katkılı ZnO ince filmlerinden, ZCO ince filmi ortalama %1 ve %9 katkı oranında sırasıyla en yüksek ve en düşük yansıtıcılığa sahiptir.



Şekil 4.5. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin geçirgenlik, soğurma ve yansıma optik spektrumları

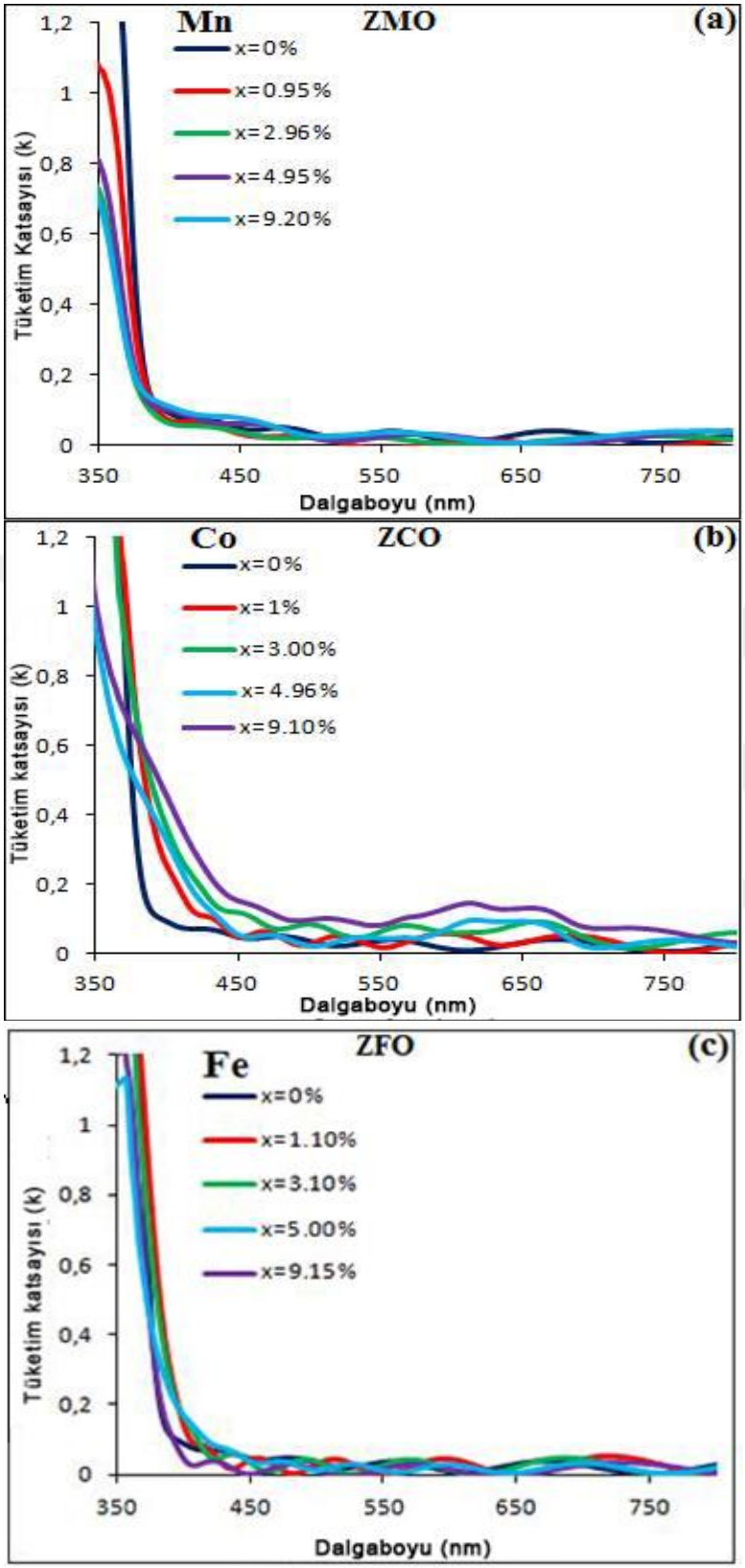
$Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmleri için $(\alpha h\nu)^2$ karşı hν enerji değişiminin lineer kısmının αhν=0 noktasına gittiği kısımdan ekstra bir eğri çizilerek Eg değerleri hesaplanmaktadır. Bu hesaplamayı kullanarak geçiş metali katkılı ZnO filmlerinin direkt bant aralığı Şekil 4.6' da verildiği gibi değerlendirilir. Hesaplanan sonuçlardan, ZnO' te nazaran ZFO (3.28, 3.27, 3.25, 3.23) ve ZCO (3.28, 3.26, 3.21, 3.16) ince filmlerinin Eg değerlerinin, Fe (%1.10, %3.10, %5.00, %9.15) ve Co (%1.00, %3.00, %4.96, %9.10) geçiş metali katkı oranıyla uyumlu olarak azalırken, ZMO (3.30, 3.31, 3.33, 3.34, 3.35) Eg değerlerinin Mn (%0.0, %0.95, %2.96, %4.95, %9.20) katkı miktarıyla arttığı görülmüştür.



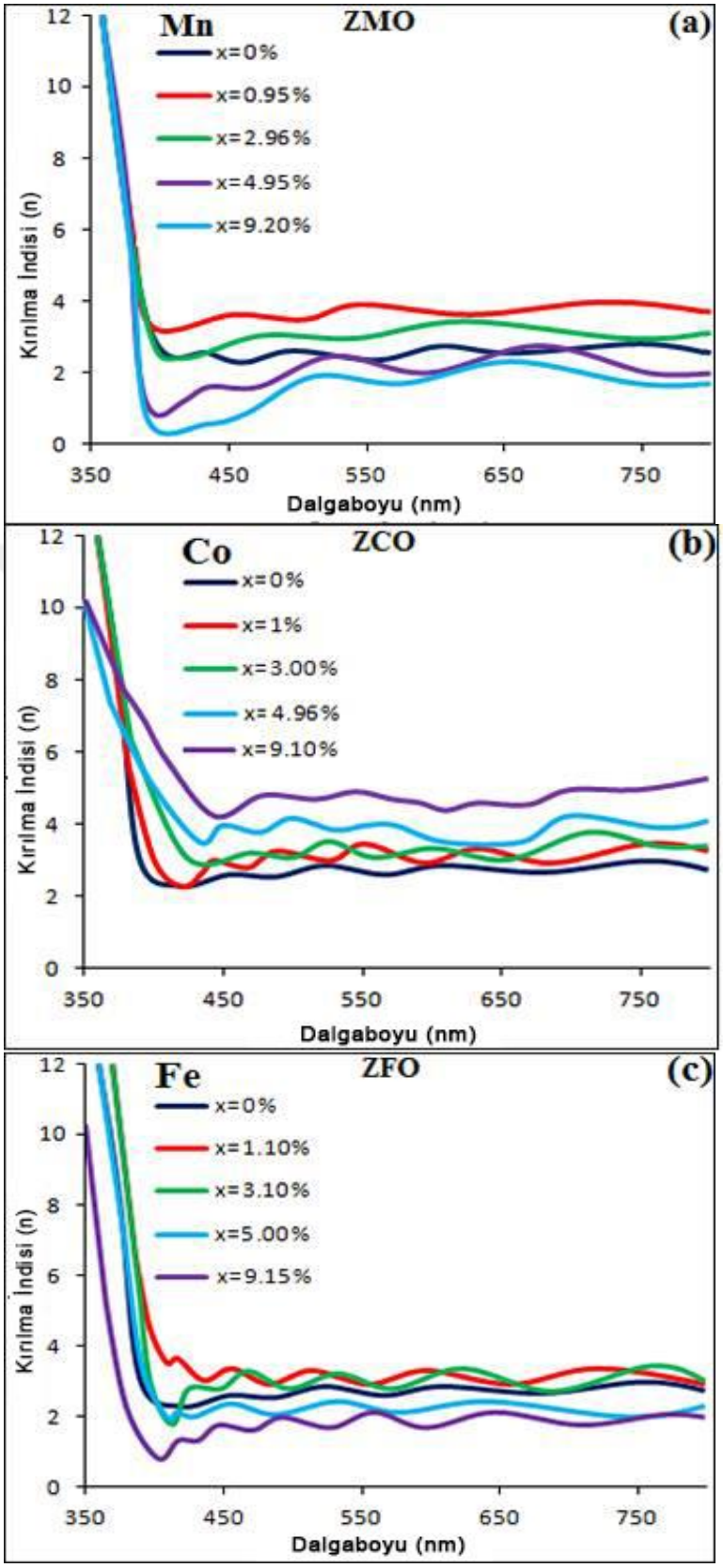
Şekil 4.6. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin oda sıcaklığındaki hν enerjisinin fonksiyonu olarak $(\alpha h\nu)^2$ değişimi

Şekil 4.7 ve 4.8' de ise farklı geçiş metali içeren ZnO filmleri için λ (350-850 nm) ile sönüm katsayısı (k) ve kırılma indisi (n)' nin farklılıklarını göstermektedir. Şekil 4.7a-c' de, k'nın λ (<450 nm) değeri için keskin bir biçimde düştüğü gözlemlenmektedir. Daha sonra farklı geçiş metali katkıları ve içeriklerinde farklı tutum sergilenmektedir. Katkısız ZnO filmleriyle karşılaştırıldığında, ZMO filmleri daha düşük k değerine sahiptir ve k değeri, artan dalga boyuyla ve Uv bölgesinde ZMO filmlerindeki geçiş metali katkı seviyesinin artışıyla monoton şekilde önce azalır sonra artar (Şekil 4.7a). Katkısız ZnO filmleriyle ZFO filmleri karşılaştırıldığında ise, k görülebilir bölgede, öncelikle artar daha sonra artan dalga boyuyla ve geçiş metali katkı seviyesiyle azalır. Bu bulgular ZFO ve ZMO üzerine yapılan çalışmalarla oldukça uyumludur. ZMO ve ZFO filmlerinin aksine, ZCO filmlerinde artan dalga boyuyla ve geçiş metali katkı seviyesiyle k artar. Bu durumda geçiş metali katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerinde ZCO en yüksek k değerine sahiptir.

Filmlerin kırılma indisi (n) λ (<450 nm)' de bulunan k için aynı tutuma sahiptir. Fakat Uv bölgesindeki k 'nın gösterdiğinden farklı bir tutum sergiler. Kırılma indisinin dalga boyuyla paralel arttığı barizdir (Şekil 4.8a-c). Şekil 4.8a ve 4.8c' de bulunan ZMO ve ZFO filmlerinde kırılma indisinin, %1 geçiş metali katkı seviyesiyle arttığı ve daha sonra artan %3-9 geçiş metali ortalama katkı seviyesiyle gitgide azaldığı görülmektedir. Fakat ZCO filmlerinde (Şekil 4.8b) artan geçiş metali ortalama katkı seviyesiyle artar. Bu çalışmada ZnO' nun ortalama n değerine yaklaşık olarak görülen mesafede 2,4 değerinde olmakta ve bu da ZnO filmleriyle ilgili rapaor edilen sonuçlarla oldukça uyumludur. Fakat, geçiş metali katkı türüne ve içeriğine göre değişmektedir. ZMO filmleri arasında, %1 ve %9 ortalama geçiş metali katkı seviyesi için sırasıyla en düşük ortalama n değeri 1,8 ve en yüksek 3,8' tür. ZCO filmleri arasında ise aynı katkı oranıyla en düşük n değeri 2,5 ve en yüksek 4,3' tür. ZFO filmleri arasında ise en düşük ortalama n değeri 1,7 ve en yüksek 3,6'dır (Şekil 4.8a-c). Kırılma indisi(n)' nin artması yada azalması farklı geçiş metali katkıları seviyelerinden kaynaklanan bileşimlere bağlanabilir ve bu da filmlerin optik kalitelerinde artmaya ya da azalmaya yol açmaktadır.

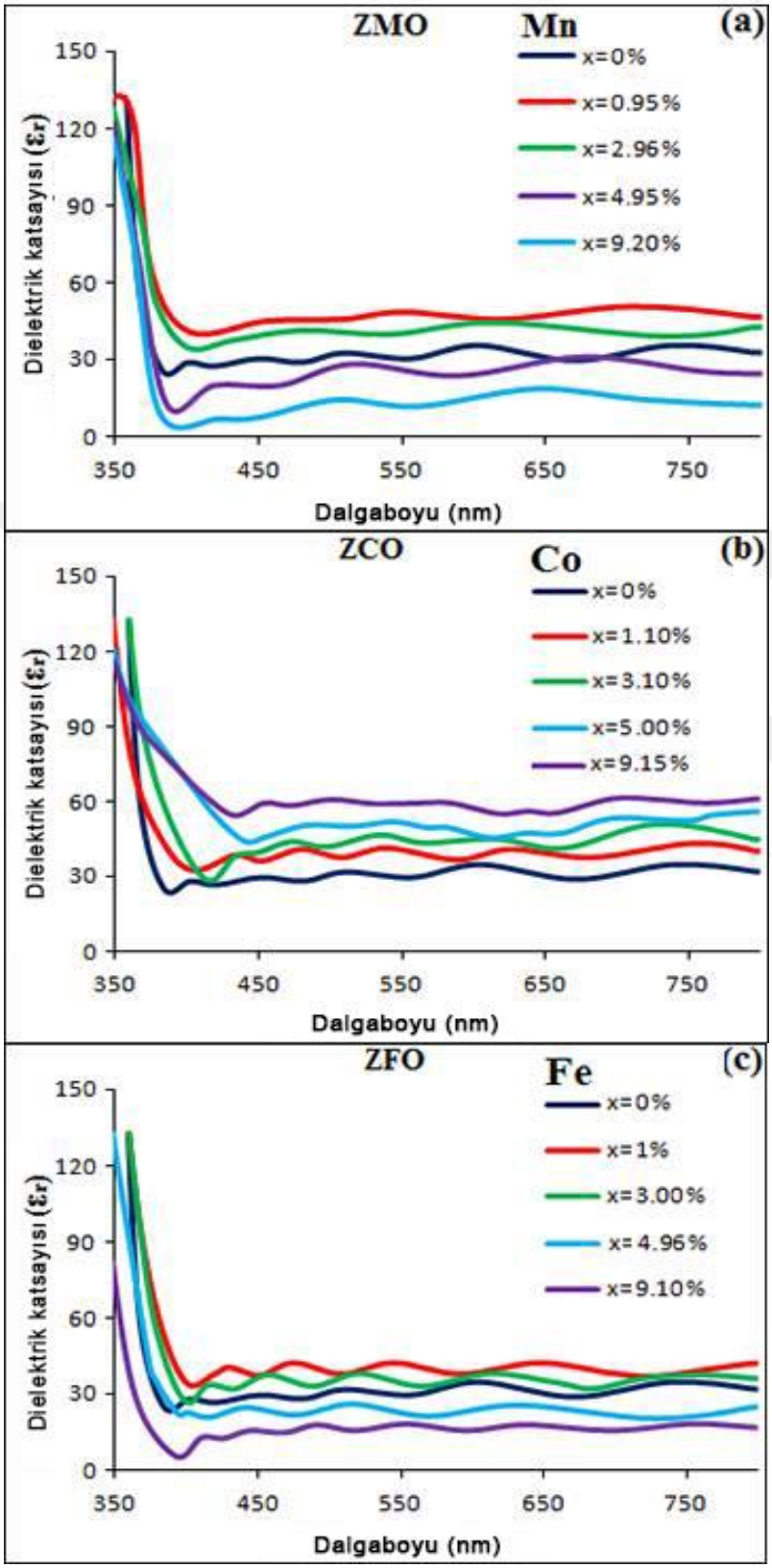


Şekil 4.7. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin oda sıcaklığında k-λ değişimi

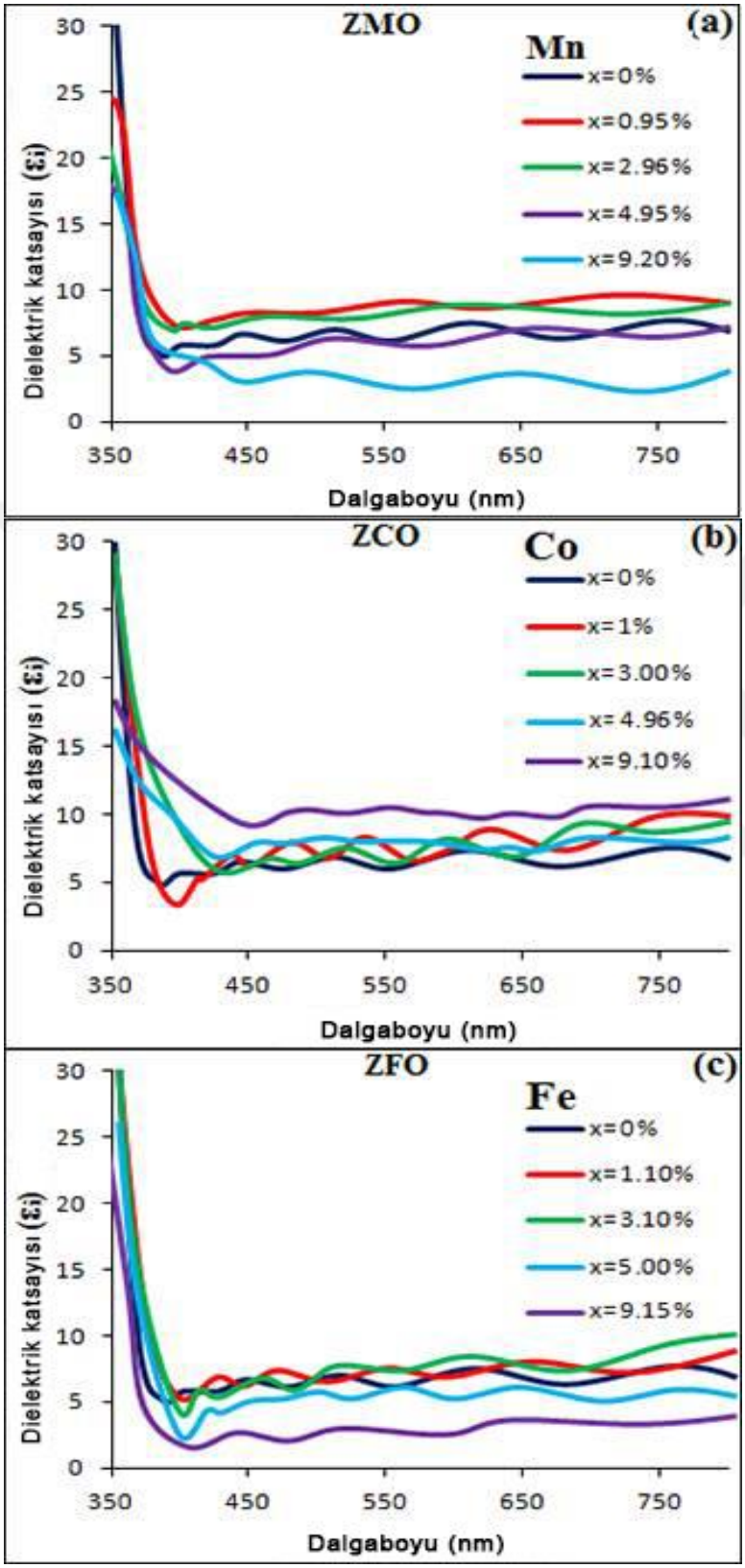


Şekil4.8. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin oda sıcaklığında n-λ değişimi

Şekil 4.9a-c ve Şekil 4.10a-c' de ise katkısız ve geçiş metali katkılı ZnO ince filmlerinin dielektrik sabitleri ve dalga boyu olarak sabitleri verilmiştir. Genellikle tüm filmlerin ε_r bölümlerinin ε_i, den yüksek olduğu gözlenmiştir ve ZnO filmleriyle karşılaştırıldığında ZMO ve ZFO filmlerinin ε_r ve ε_i' si, görünür bölgede %1-9 ortalama geçiş metali katkı seviyesi oranıyla öncelikle artmış sonra gitgide azalmıştır. Fakat ZCO filmlerinde, görünür bölgede ε_r ve ε_i artan dalga boyu ve geçiş metali katkı seviyesiyle birlikte artar. Geçiş metali katkılı ve katkısız ZnO ince filmlerinde, ZMO filmi %1 ve %3 ortalama geçiş metali katkı oranıyla, en yüksek ε_r ve ε_i ortalamasına sahiptir. Ancak %5 ve %9 ortalama geçiş metali katkı oranı için ZCO en yüksek ε_r ve ε_i ortalama değerlerine sahiptir. Bu özellik, nanokristal yapılarda Zn boşlukları ile yükseltgenen veya indirgenen geçiş metallerinin etkileşmesinden etkilenen yük dengesinin polarizasyonu arttırmasına atfedilebilir. Böylece ZCO ve ZMO filmlerinin optoelektronik ve optik cihazlar için, katkısız ve geçiş metali katkılı ZnO filmleri içerisinde en iyi optik özelliklere aday oldukları çıkarımı yapılabilir.



Şekil 4.9. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin oda sıcaklığında ε_r-λ değişimi



Şekil 4.10. $Zn_{1-x}TM_xO$ ince filmlerinin oda sıcaklığında ε_i-λ değişim

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, RF magnetron saçtırma yöntemi ile farklı katkı seviyesinde (x=%1-9) katkılanan $Zn_{1-x}TM_xO$ (TM= Mn,Fe ve Co) ince filmlerinin cam altlıklar üzerine kaplanarak üretildi. Bununla birlikte, RF magnetron saçtırma yöntemiyle üretilen ince filmlerde geçiş metali katkı oranlarının, filmlerin yapısal, optiksel ve dielektrik katsayısına etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçları incelersek; XRD yapısal analizler tüm filmlerde hegzagonal wurtzite kristal yapıda c ekseni boyunca (002) yönüne yöneldiği ortaya çıkmıştır. Katkısız ZnO filmleriyle karşılaştırıldığında, özellikle %3 ve %5 geçiş metali seviyeli Fe katkılı ZnO (ZFO) filmleri haricinde, geçiş metali katkılı tüm filmlerde kristal kalitesinin doğrusal olarak azaldığı görülmüştür. Örgü paramaetresi c, geçiş metali katkı oranının artmasıyla %1'den %9' a artan geçiş metali katkı seviyeli Co katkılı ZnO (ZCO) filmlerinde önemli derecede değişmezken, Mn katkılı ZnO (ZMO) ve Fe katkılı ZnO (ZFO) filmlerinde artmıştır.

Üretilen ZMO, ZCO ve ZFO nanoyapılı ince filmlerinin kiyasal birleşimi ve atomik yüzdesini kontrol etmek için %0 ve %5 ortalama geçiş metalinin ortalama katkı seviyeleri için EDX analizleri yapılmıştır. Analizler Zn, Mn, Co, Fe ve Si' nin varlığını doğrulayarak atomsal yüzdelerini belirlemiştir. SEM yüzey görüntüleme sisteminde ise ZnO, ZMO, ZCO ve ZFO filmlerinin farklı şekle sahip olan tanecikli yapıda pürüzsüz ve homojen bir kaplamaya sahip olduğu bariz şekilde görülmektedir. SEM görüntülerinde ölçülen enine kesitte kalınlıkları yaklaşık 78-110 nm olarak belirlenmiştir.

Optik ölçümler filmlerin optik yasak bant aralığının artan geçiş metali içeriğiyle ZMO filmlerinde arttığı, ZCO ve ZFO filmlerinde azaldığı görülmüştür. Kırılma indisi(n), soğurma katsayısı(k) ve dielektrik sabitlerinin (gerçel olan ε_r ve sanal olan ε_i) gibi optik sabitleri geçiş metalinin türü ve içeriğine güçlü şekilde bağlıdır. Bütün filmlerin arasında sırasıyla %1 ve %9 aralığında geçiş metali ortalama katkı seviyeleri için en yüksek sönüm katsayısı ZCO filmlerinde, en yüksek

kırılma indisi ve dielelktrik sabiti ZMO ve ZCO filmlerinde elde edilmiştir. Bu durum muhtemelen filmlerin değiştirilen geçiş metali katkı seviyesinin ve geçiş metali türünün artırılan soğurma katsayısını, yoğunluğuna ve kutuplaşmasını artırmasına bağlanmıştır. Böylelikle, üretilen ince filmler arasındandan ZMO ve ZCO filmlerinin optik, optoelektronik ve dielektrik uygulamalar için umut vaat eden en iyi adaylar olduğu saptanmıştır.

KAYNAKLAR

AKSOY, Ç., 2011. Se Yarıiletken Kristalinin ve Amorf İnce Filmlerinin Doğrusal Olmayan Optik Soğurma Özellikleri. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara 2011, 4p.

BEHRISH, R., 1981. Sputtering by Particle Bombardment II. Springer-Verlag. Berlin, 193p

BUBE, R.H., 1970. Photoconductivity of Semiconductor Devices. John Wiley and Sons Inc., London.

BULUN, G., 2010. 3d- Geçiş Metali Ni katkılı $Zn_{1-x}Ni_xO$ ve 4f- Lantanit Gd katkılı $Zn_{1-x}Gd_xO$ Bileşiklerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana 2010, 25 p.

COMPAAN, A. D., GUPTA, A., LEE, S., WANG, S., and DRAYTON, J., 2004. High Efficiency Magnetron Sputtered CdS/CdTe Solar Cells. Solar Energy. 77:815–822. Encylopedia of Chemical Technology, 1998.

GÖKTAŞ, A., 2013. II-IV Tabanlı Seyretilmiş Magnetik Yarıiletken İnce Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Manyetik Özelliklerinin incelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, Şanlıurfa 2013,78 p.

GÖKTAŞ, A., MUTLU, I.H., YAMADA, Y., and ÇELİK, E., Influence of pH on the structural optical and magnetic properties of $Zn_{1-x}Mn_xO$ thin films grown by sol-gel method. Journal of Alloys and Compounds 553, Şanlıurfa 2013, 259-266.

GÖKTAŞ, A., MUTLU, I.H., and YAMADA, Y., Influence of Fe-doping on the structural, optical, and magnetic properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method. Superlattices and Microstructures 57, Şanlıurfa 2013, 139-149.

GÖKTAŞ, A., ASLAN, F., and TUMBUL, A., Nanostructred Cu-doped ZnS polycrystalline thin films produced by a wet chemical route: the influences of Cu doping and film thickness on the structral, optical and electrical properties. Journal of superconductivity and novel magnetism 25 (8), Şanlıurfa 2015, 45-53.

GÖKTAŞ, A., ASLAN, F., MUTLU, I.H., and YAŞAR, E., Preparation and characterisation of thickness dependent nano-structured ZnS thin films by sol-gel technique. Hournal of Materials Science, Şanlıurfa 2012, 1361-1366.

GRIGORIEV, I.S. and Meilikhov, E.Z., 1997, Handbook of Physcal Quantities

GÜNDÜZ,E.,1999.Modern Fiziğe Giriş. Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi No:1,İzmir

HE, H.-Y., HUANG J.-F., FEİ, J., and LU, J., 2014. La-doping content effect on the optical and electrical properties of La-doped ZnO thin films.

X., HONG, D., YAN, L., and HANG, C., 2006. Al-doping effects on structure, electrical and optical properties of c-axis-orientated ZnO:Al thin films. Materials Science in Semiconductor Processing. 9(2006): 132-135.

JANOTTI A., and VAN DE WALLE C. G., 2009. Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. Reports on Progress in Physics,72(12):126501.

KARA, K., 2008. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama Yöntemi ile p-tipi ZnO Üretimi ve Yapısal Özellikleri. 26 p.

LIN, Y., JIANG, D., LIN, F., SHI, W., and MA, X., 2007. Fe-Doped ZnO Magnetic Semiconductor by Mechanical Alloying. Journal of Alloys and Compounds, 436:33.

MINAMI, T., NANTO, H., SHOOJI, S., and TAKATA, S., 1984. The Stability of Zinc Oxide Transparent Electrodes Fabricated by R.F. Magnetron Sputtering. Thin Solid Films, 111:167–174.

ÖZEN, Y., 2010. Püskürtme Tekniği İle Elde Edilen TiO2 Filminin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2010, 34 p.

ÖZGÜR, Ü., ALİVOV, Ya. I., LİU, C., TEKE, A., RESHCHİKOV, M. A., DOĞAN, S., AVRUTİN, V., CHO, S. J., and MORKOÇ, H., 2005. A comprehensive review of ZnO materials and devices Journal of applied physics 98, 041301.

PANKOVE, J.I., 1971. Optical Process in Semiconductors. Princeton Press, New Jersey, USA.

POLAT, G., 2009. Sol-Jel yöntemi ile bakır ve kalay katkılı ZnO ince filmlerin üretilmesi, optik ve mikroyapısal karakterizasyonu. yük.lisans tezi Gebze Yük. Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü

SCHMIDT, L., Macmanus, J. L., 2007, ZnO – nanostructures, defects and devices. Materials today, 10, 40-48.

SCHULER, T.,Aergeter, M., A., 1999. Optical, electrical and structural properties of sol-gel ZnO: Al coantings.Thin solid Films. 351: 125-131.

SHIMOMURA, S. Ebisu and S. Nagata, "Synchrotron X-ray Diffraction Studies of α-Gd2S3", J. Phys. Soc. Jpn. 74, 1598-1601, 2005.

SINGH, S., DEY, P., J. N. ROY AND S. K. MANDAL, 2013. Enhancement of dielectric constant in transition metal doped ZnO nanocrystals.

STUDENIKIN, D.Y.Protasov, V.Ya.Kostyuchenko, and V.S.Varavin Characterization of molecular beam epitaxy p-$Cd_xHg_{1-x}Te$ layers using the photoconductive effect in crossed ExB fields . Materials Science and Engineering - B - Solid State Materials for Advanced Technology, 1997, v.44, pp.288-291

TAKCI, D.K., 2011. Pfcvad Sistemiyle ZnO:Al Bileşiklerinin Üretilmesi ve Karekterizasyonu. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana 2011, 19p.

TEPE, M., AKUBAY, D., AVCI, I., ve ÖKTEM, B., 2007. Yüksek Sıcaklık Süperiletken YBa2Cu3O7-x IR Bolometre (Termal Dedektör) Tasarımı ve Uygulamaları. Tübitak projesi (104M194), İzmir, 65s.

UEDA K., TABATA H., and KAWAI T., 2001. Magnetic and electric properties of transition-metal-doped ZnO films. Applied Physics Letters,79(7):988-991.

YAVUZ, F., 2012. Kimyasal Depolama Yöntemi İle Elde Edilen PbS Yarıiletken Filmlerin Yapısal ve Optiksel Özellikleri. 12-18-20 p.

WANG, L.-W., Wang, XU, Z., and ZHANG, F.-J., Zhang, ZHAO, S.-L., and LU, L.-F., 2010. Structure, Optical, and Magnetic Properties of Mn-doped ZnO Films Prepared by Sputtering. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,17:475–480.

WARDLE M. G., GOSS J. P., BRIDDON P. R., 2005. Theory of Fe, Co, Ni, Cu, and their complexes with hydrogen in ZnO. Physical Review B, 72:155108-155121.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Hüda Seçil Gündüz
Uyruğu **:** T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi **:** Malatya – 11.04.1987
Telefon **:** 506 5875686
e-mail **:** h_secil_gunduz@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Malatya Lisesi, Malatya	2004
Üniversite	: Harran Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Şanlıurfa	2012
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstistüsü Fizik Anabilim Dalı, Şanlıurfa	2015

UZMANLIK ALANI: Yarıiletkenler

YABANCI DİLLER: İngilizce