

## \* ZnO TABANLI YARIİLETKENLERDE METAL KONTAK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI\*

*Investigation of Metal Contact Properties at ZnO Based Semiconductors*

Nihal TOZLU  
Fizik Anabilim Dalı

Hamide KAVAK  
Fizik Anabilim Dalı

### ÖZET

Bu çalışmada Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama (PFCVAD) sistemi kullanılarak cam alt tabanlar üzerine oda sıcaklığında çinko nitrür ve çinko oksit ince filmler üretildi. Çinko nitrür filmlerin 450 °C de tavlama ile p-tipi ZnO (Çinko Oksit) ince filmler elde edildi. Doğal olarak n-tipi olan çinko oksit ince filmler de 450 °C de tavlandı. İnce filmlerin optik özellikleri belirlendi. Bu ince filmler üzerine Ag (Gümüş), Al (Alüminyum), In (İndiyum) metalleri Vakum Termal Evaporasyon sistemi ile kontaklar yapıldı. Bu örneklerin I-V ölçümleri yapılarak kontakların özellikleri araştırıldı. Kontaklar omik olarak bulundu.

**Anahtar Kelimeler:** PFCVAD, ZnO, omik Kontak, Doğrultucu (Schottky) Kontak

### ABSTRACT

In this study thin zinc nitride and zinc oxide films were deposited at room temperature on glass substrates by a pulsed filtered cathodic vacuum arc deposition (PFCVAD) system. The zinc nitride thin films changed into p-type ZnO (Zinc Oxide) thin films by annealing at 450 °C. As deposited n-type ZnO (Zinc Oxide) thin films annealed at 450 °C. Optical properties of these thin films were determined. The metal contacts were made on these thin films with Ag (Silver), Al (Aluminium), In (Indium) by Vacuum Thermal Evaporation system. The contact properties of these films were investigated by I-V measurements. The contact types were found to be ohmic.

**Key Words:** PFCVAD, ZnO, ohmic Contact, Schottky Contact

### Giriş

Günümüzde yoğun madde fiziğinin en çok ilgi gören araştırma dalları arasında ince film teknolojisi ve bu teknoloji için üretilen filmlerin özelliklerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Üretilen bu yarıiletkenler çok küçük hacimler

---

\* Yüksek Lisans Tezi - M. Sc. Thesis

içinde birçok işleve sahip olan, hızlı elektronik devre elemanlarının meydana getirilmesini kolaylaştırır ve bu teknolojinin gelişimine katkıda bulunmaktadır.

II-VI grup elementleri kendi aralarında ikili bileşik meydana getirirler, II. grup elementi olan Zn ve VI. grup elementi olan O, ZnO bileşik yarıiletkenini oluştururlar.

ZnO (Çinko oksit) yarıiletken bileşiği geniş (3.4 eV) ve direk bant aralığına, yüksek erime sıcaklığına, yüksek kırılma voltajına sahiptir. Bundan dolayı teknolojiye ve bilimsel çalışmalarda önemli bir yere sahiptir. Yüksek güç, yüksek sıcaklık, yüksek frekans devrelerinde kullanılabilirler. Diğer yarıiletkenlere göre yüksek enerjili elektron radyasyonuna karşı dirençli olmalarından dolayı parçacık radyasyonunun yüksek olduğu uzay araştırmalarında ve nükleer santraller gibi karasal uygulamalarda da kullanılabilirler

Yarıiletken ince filmler mikro elektronikte yaygın kullanıldığı gibi, optik uygulamaları açısından da çok büyük öneme sahiptirler. Bu optik kaplamalar, geniş kullanım alanları nedeniyle geniş ürün yelpazesine ve ekonomik pazara sahiptirler.

Yüksek eksiton enerjisine sahip olmaları nedeniyle ışık üretme verimi diğer yüksek enerji aralıklı yarıiletkenlerden fazladır. Bu nedenle gösterge panellerde, LED ve lazerlerde kullanıma potansiyeline sahiptirler. Bundan başka yakın UV' den yakın kırmızı altı bölgeye kadar pek çok amaçlı kullanılabilen geniş ve dar band geçiren optik filtrelerin üretiminde ve güneş pillerinde, gerilim düzenleyici olarak yüksek gerilim veya düşük akım elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca savunma sanayinin ihtiyacı olan gece görüş sistemlerinde, ısı kameralarda kullanılır. Ayrıca çeşitli aynalar ve özellikle enerji tüketimini azaltmakta kullanılan mimari camlarda yaygın olarak kullanılır.

Bu çalışmada atmalı katodik vakum ark depolama yöntemiyle oluşturulan ZnO yarıiletkeni ile metallerin yaptığı kontakların özellikleri araştırılacaktır. Havada ve vakumda ZnO' nun yüzey ile kontak özelliklerinin bağımlılığı termal yöntemle belirlenecektir.

Kontak, kullanılan metalin cinsine bağlı olarak doğrultma ya da omik özellikli olarak meydana gelebilir. ZnO kontaklarının özelliklerini belirlemedeki başlıca faktör yarıiletken yüzey potansiyelinin metale göre aldığı durumdur.

Metal ve yarıiletken bileşikler arasındaki kontak ile ilgili yapılan çalışma bu bileşiklerin çeşitli yüzey özelliklerini gözlemede ve kendine özgü iletkenliği ve genelde ilginç özellikleri olan yarı iletkenleri temel olarak aygıt inşa edebilme olasılığını belirlemede önemlidir.

Genelde kristalde iyonik bağlı olan yarıiletkenlerde, metal-yarıiletken kontağı için bariyer yüksekliği Schottky teorisi ile tanımlanır. Ancak ZnO için yaklaşık % 64 iyonik olmasına rağmen, metal- yarıiletken bariyer yüksekliği üzerinden elde edilen deneysel veriler çelişkilidir. Yüksek oksijen afinitesine sahip metaller ( Al,Sn,Ti...) ZnO ile birleştirildikleri zaman omik ya da alçak bariyer yüksekliğine sahip kontaklar üretirler.

Sonuç olarak bu çalışmada günlük hayatta yaygın olarak kullandığımız elektro-optik aygıtlar için en uygun ZnO-metal kontaklar elde edilecektir. Bu sayede yapılan çalışma sonunda hem bilimsel, hem de endüstriyel yararı bulunan birçok aygıtın üretimi ve aygıtların çalışma prensiplerinin anlaşılması kolaylaşacaktır.

### **Materyal ve Yöntem**

Atmalı filtreli katodik vakum ark depolama yöntemi (Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition (PFCVAD)), ince film depolama yöntemleri içinde, plazma yardımcı işlemlerden oluşan, en iyi fiziksel buhar depolama (PVD) tekniğidir.

PFCVAD işlemi diğer iyonla kaplama işlemlerine göre daha yüksek iyonizasyon ve daha yüksek parçacık enerjisine sahiptir. Katodik ark işlemi değişik metallerin, bileşik filmlerin ve diğer alaşım filmlerin farklı aşınma direnci, korozyon direnci gerektiren uygulamalar ve dekoratif uygulamalar için kullanılır.

Katodik ark işlemi sırasında, ark spot oluşturulur, katot aşındırılır ve yüksek dereceli iyonizasyona sahip olan plazma üretilir. Yüksek iyon yoğunluğu; film morfolojisinin kontrolü, yüksek tutunma, bileşiklerin etkin reaktif depolanmasını ve değişik yapılar da düzgün depolanma olmasını sağlar. Alaşımlar, bileşimler genelde kaynaktan alt tabakaya taşınır. Depolama oranları dakikada nanometreden mikrometreye kadar değişen geniş bir aralığı kapsar.

Sisteme katot, elektrot ve tetikleyici elektrotu bağlayarak ince bir iletken filmi oluşturmak için yüksek güçlü bir atma kullanılmıştır. Bu elektrotları ayarlayan yaygın bir metot bu elektrotları iç içe koaksiyel yapmak ve onları bir yalıtkan ile ayırmaktır. Tetikleyici elektrot ve katot arasında mikro saniye için 24 kilovolt civarında bir gerilim uygulanmıştır. Bu ark deşarjın tetiklenmesi ve istenen başlangıç plazmayı yaratmak için genellikle yeterlidir. Plazmanın devamı için anot ve katot arasında bir eşik gerilimi uygulanmıştır. Oluşan plazma katot ile anot arasında polarize olur. Böylece katottan anota doğru hareket edebilir. Plazma, filtrenin etrafına sarılı olan tellerden kaynaklanan manyetik alan ile saptırılarak içerisinde bulunan makro parçacıkların filtrenin içerisinde kalması sağlanır. Filtreden geçen plazma filtrenin alt kısmına yerleştirilmiş cam alt taban üzerine düşer. Böylece çinko oksit veya çinko nitrür ince filmi depolanmış olur.

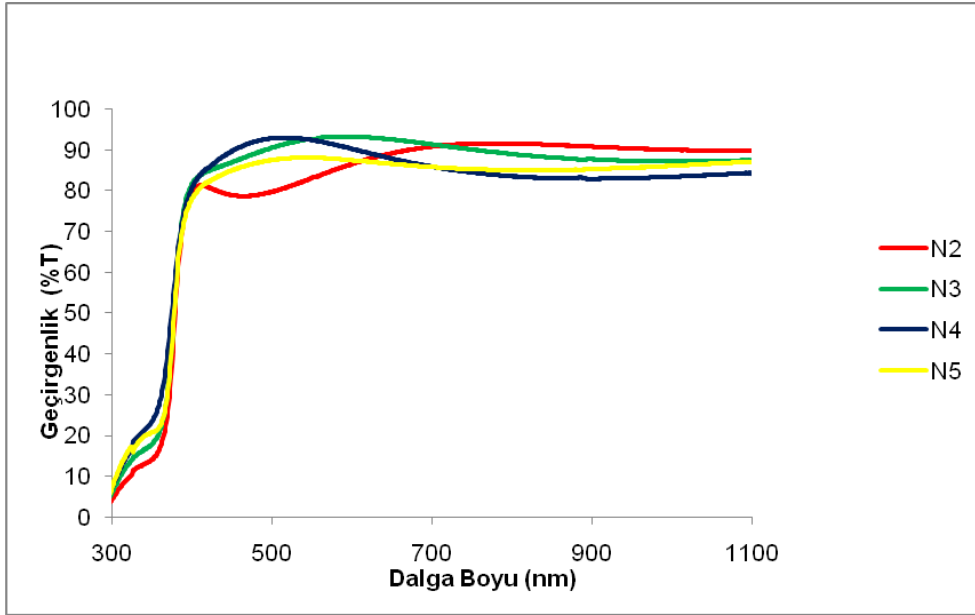
Isısal buharlaştırma yöntemi saf filmler elde edilebildiği ve değişkenleri çok olduğu halde kontrol edilebildiği için en yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  torr basıncına kadar havası bir difüzyon pompası yardımı ile boşaltılmış bir vakum odası içerisinde, buharlaştırılacak madde, metal filamandan yüksek akım geçirerek ısıtılır.

Buharlaşma noktasının üstünde belirli bir sıcaklıkta, kaynaktan her yönde Ag (gümüş), Al (alüminyum) ve In (indiyum) metallerinin atom veya molekülleri yayılır. Buhar halindeki bu atomların, kaynaktan belli mesafeye (10-25 cm) konmuş ince film üzerinde toplanması ile ince film üzerine istenen kontak elde edilir. Film üzerine yerleştirilen maske sayesinde ikili noktalar halinde kontaklar yapılmıştır.

### Araştırma Bulguları ve Tartışma Optik Özellikler

PFCVAD yöntemi ile aynı basınçta, yaklaşık  $2.2 \times 10^{-4}$  Torr basıncında, üretilen çinko nitrür ve çinko oksit ince filmleri bir saat atmosfer ortamında  $450^\circ\text{C}$ 'de tavlansın optik geçirgenliğine bakıldı. Bu ölçümler ile soğurma kenarı, enerji bant aralığı, kırılma indisi (zarf metoduyla), film kalınlığı hesaplandı.

PFCVAD yöntemi ile yaklaşık  $2.2 \times 10^{-4}$  Torr basıncında, üretilen çinko oksit ince filmlerine N2 ve N3 isimleri, çinko nitrür ince filmlerine N4 ve N5 isimleri verilmiştir. Birer saat atmosfer ortamında  $450^\circ\text{C}$ ' de tavlansın bu filmlerden N2 ve N3, n tipi özelliği taşımaktadır. Çinko nitrür ince filmlerinde tavlama sırasında, oksijenin kimyasal aktivitesi azotunkinden daha yüksek olduğu için ince filmin içindeki Zn atomları, N' den ziyade O ile birleşmeyi tercih eder (Li ve ark.). Birer saat atmosfer ortamında  $450^\circ\text{C}$ ' de tavlansın bu filmlerden N4 ve N5, p tipi özelliği taşımaktadır.



Şekil 1.  $450^\circ\text{C}$  de tavlansın ince filmlerin dalga boyuna karşı geçirgenlik eğrileri

Elde edilen bu farklı kalınlıktaki ince film örneklerinin geçirgenlik değerlerinin yüksek olduğu, görünür bölgede (400–700 nm) % 94 civarında olduğu ve kalınlık arttıkça da azaldığı gözlemlendi. Geçirgenlikteki bu değişimler taşıyıcı konsantrasyonunun artışıyla ilişkilidir.

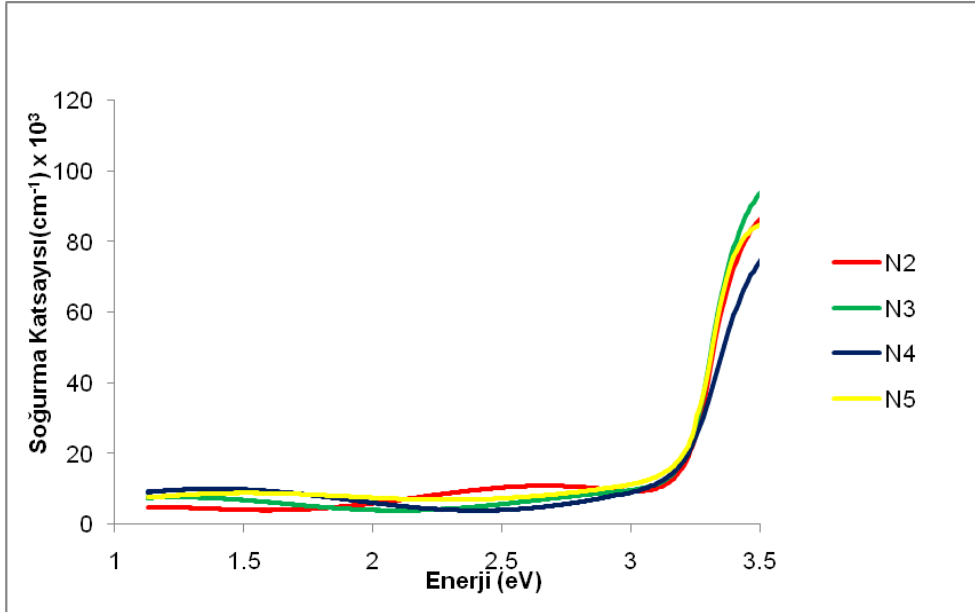
ZnO' nun soğurma katsayısı yüksek foton enerjilerinde eksiton etkilerinin gözardı edildiği durumlarda

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}$$

ilişisini sağlamaktadır. Burada,  $E_g$ , ince filmin optik bant aralığını göstermektedir ve A ise bir sabittir. Yakın soğurma kenarında,  $\alpha$ , aşağıdaki ifade ile belirlenebilir;

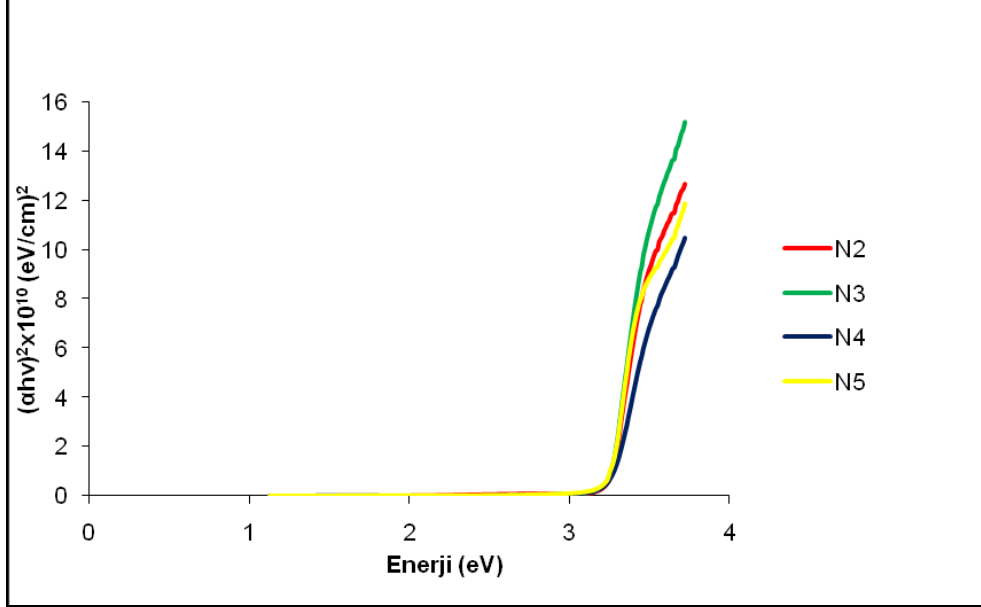
$$\alpha = -Ln(T)/d,$$

Burada d, filmin kalınlığını belirtmektedir (Yan ve ark, 2005). Örneklerin, soğurma bölgesindeki,  $\alpha$ ' nın foton enerjisine ( $h\nu$ ) karşı grafiği Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. 450 °C de tavllanmış filmlerin  $\alpha$  - E değişimi

Aynı basınç ( $2.2 \times 10^{-4}$  Torr) farklı kalınlıklarda elde edilen ZnO ince filmlerin  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin enerjiye göre değişimi Şekil 3 görülmektedir. Bu eğrilere çizilen teğetin enerji eksenini kestiği nokta yasak enerji aralığını vermekte olup, elde edilen filmlerin yasak enerji aralıkları bu yolla bulunmuştur. Şekil 3' ten kalınlık arttıkça yasak enerji aralığının arttığı gözlenmiştir.



Şekil 3. 450 °C de tavllanmış filmlerin  $(ahv)^2$ -E değişimi

450 °C' de birer saat tavlanan N2, N3, N4 ve N5 ince filmler için hesaplanan kalınlık, soğurma kenarı ve enerji bant aralığı değerleri Çizelge 1'de verilmiştir

Çizelge 1. İnce filmlerin optik karakterizasyonu

Filmin adı	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Soğurma Kenarı (nm)	Enerji Bant Aralığı (eV)	Kalınlık (nm)
N2	450	391	3.282	166
N3	450	390	3.276	173
N4	450	387	3.289	240
N5	450	386	3.286	248

### Elektriksel Özellikler

Hall Effect Measurement System HMS-3000 sistemi kullanılarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Bu sistemle filmlerin, Hall mobilitesi, taşıyıcı konsantrasyonu, direnci, yüzey konsantrasyonu ve iletkenlikleri hesaplanmıştır. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için taşıyıcı yoğunluğunun işaretine

bakılmıştır. Alıcı veya p-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti pozitifdir, verici veya n-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti negatiftir.

Çizelge 2. Filmlerin elektriksel karakterizasyonu

Örnek	Kalınlık (nm)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Hall Mobilitesi (cm <sup>2</sup> /Vs)	Taşıyıcı Konsantrasyonu (1/cm <sup>3</sup> )	Özdirenç (Ωcm)	Taşıyıcı Tipi
N2	166	450	2.360x10 <sup>3</sup>	-4.073x10 <sup>13</sup>	6.493x10 <sup>1</sup>	n
N4	240	450	1.999x10 <sup>1</sup>	8.488x10 <sup>14</sup>	3.679x10 <sup>2</sup>	p

Üretilen n tipi N2 ince filminin 450 °C' de tavlandıktan sonrada n tipi davranış sergilediği, N4 ince filminin ise 450 °C' de tavlandıktan sonra p tipine dönüştüğünü Hall ölçümlerine bakarak söyleyebiliriz

### Isısal Buharlaştırma İle Yapılan Kontaktların I-V Özellikleri

Kontaktlar Jee-4X Vakum Evaporator aleti kullanılarak ısısal buharlaştırma ile yapılmıştır. İnce film üzerine ikişer noktali maskeler yerleştirildi, bu işlem sonrası Al, Ag ve In kontaktları yapıldı. Yapılan kontaktlar daha sonra akım gerilim değişimi hp4156C Yarıiletken Parametrik Analizörü sistemi ile incelenmiştir. Uygulanan gerilime göre akım grafikleri çizilmiştir.

N3 ve N5 ince filmleri ile Gümüş, Alüminyum ve İndiyum metalleri arasındaki kontakta akım gerilim ile doğrusal bir değişim göstermektedir. Bu durumda kontaktlarımız omiktir.

### Sonuç

Atmalı filtreli katodik vakum ark depolama (PFCVAD, Pulsed Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition) sistemi ile çinko nitrür ve çinko oksit ince filmler oda sıcaklığında cam alt tabanlar üzerine depolandı. ZnO ince filmler görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip saydam iletken oksit filmler olduklarından güneş pilleri, optoelektronik aygıtlar gibi teknolojinin birçok alanında uygulama bulmaktadırlar.

Üretilen ince filmlerin hepsi üretim aşamasından sonra görünür bölgede düşük optik özelliklere sahip olup tavlama ile bu özellik düzeltilmiştir. Çinko nitrür'ün ısısal oksidasyonu, bir saat atmosfer ortamında tavlama işlemi şeklinde yapılmıştır. 450 °C'de bir saat atmosfer ortamında tavlanan çinko nitrür ve ZnO ince filmlerin optik özellikleri incelenmiştir. Görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenlik değerine sahip saydam iletken oksit filmler elde edilmiştir.

Bütün ince filmlerin yüzey ve hacim taşıyıcı yoğunlukları, mobiliteleri, iletkenlik değerleri HMS-3000 Hall ölçüm sistemi ile belirlenmiştir. Genel olarak mobilite ile taşıyıcı yoğunluğunun ters orantılı olduğu, yüksek taşıyıcı yoğunluklarında düşük mobilite değerleri bulunmuştur. Buradan taşıyıcı yoğunluğunun bir kısmının kusurlardan kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu problemin çözümü için çifte katkılama (co-doping) önerilmiştir.

Üretilen p ve n tipi ZnO ince filmleri ile Gümüş(Ag), Alüminyum(Al) ve İndiyum(In) metalleri ile kontaklar yapılmıştır. Yapılan bu kontaklar hp4156C Yarıiletken Parametrik Analizörü sistemi kullanılarak akım-gerilim değişimleri göz önüne alınarak karakterize edilmişlerdir ve hepsi omik kontak olarak bulunmuştur. Alüminyum ve İndiyum ile olan kontakların omik oluşu literatüre uygundur. Ancak Gümüş ile yapılan kontak literatürde çoğunlukla Schottky kontak şeklindedir ama omik kontak oluşturan yapıların varlığı da söz konusudur. ZnO Nanotelleri ile minimum dirençli Ag (gümüş) kontaklarının omik davranış gösterdiği ve omik kontak oluşumuna neden olan metal-çinko bağının metal-oksijen bağına göre baskın olduğu rapor edilmiştir.(Tiong ve ark, 2008). Schottky kontak oluşturmak için daha fazla çalışma yapılması, üretilen çinko zengini filmlerde oksijen miktarının artırılması, metal çeşitleri değiştirilerek kontaklar yapılması ve karakterize edilerek aygıt yapımı için uygunluğunun araştırılması önerilir.

Üretilen omik kontakları karakterize etmek için özel kontak dirençlerine bakılmış ve istenilen gibi düşük değerler elde edilmiştir. Böylece ZnO tabanlı yarıiletken Gümüş(Ag), Alüminyum(Al) ve İndiyum(In) metal kontakları ile iyi özellikli omik kontakları elde edilmiştir

Sonuç olarak PFCVAD sistemi ile iyi özelliklere sahip n ve p-tipi ZnO ince filmlerin üretilmiş ve bu filmlere metal (Al, Ag, In....) leri kullanılarak yüksek kalitede omik kontaklar elde edilmiştir. Yarıiletken ince filmlere yapılan metal kontakların karakteristikleri ışık yayan diyot (LED), ince film transistör (TFT) gibi opto-elektronik aygıtların yapımı için uygun olduğunu göstermektedir.

#### **Kaynaklar**

- KAVAK, H., ESEN, R., TÜZEMEN, E. Ş., ERDOĞAN, N. H., KARA, K., YANIŞ, H., 2009. Atmalı Filtreli Katodik Vakum Ark Depolama (PFCVAD) Sistemiyle n ve p Tipi ZnO Üretimi ve Aygıt Uygulamaları. 106t613 no lu Tübitak projesi, 1-157.
- LI, B. S., LIU, Y.C., ZHI, Z.Z., SHEN, D.Z., LU, Y.M., ZHANG, J.Y., FAN, X.W., MU, R.X., HENDERSON, D.O., 2002. Optical Properties and Electrical Characterization of P-type ZnO Thin Films Prepared by Thermally Oxidizing Zn<sub>3</sub>N<sub>2</sub> Thin Films, Journal of Materials Science, 13-17.
- PATIN, D., E., WILLIAMS, D., J., O'KEEFFE, M., 1997. The Crystal Structures of Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub> and Zn<sub>3</sub>N<sub>2</sub>, Journal of Solid State Chemistry, 132:56-59.
- PANKOVE, J. I., 1971. Optical Process in Semiconductors. Dover Publications, Inc. New York, 422.



- SZE, S. M., 1981. Physics of semiconductor devices, A Wiley-Interscience Publication, New York: Wiley, 2nd ed., 7-50.
- WANG, C., JI, Z., LIU, K., XIANG, K., YE, Z., 2003. P-Type ZnO Thin Films Prepared by Oxidation of Zinc Nitride Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering, 265: 537-540.
- YUAN G., YE, Z., HUANG, J., QIAN, Q., ZHAO, B., 2004. Gold Schottky contacts on n-type ZnO thin films with an Al/Si (100) substrates. J. Crys. Growth, 268, 169 - 173.
- ZHIYONG, F., DAWEI, W., PAI-CHUN, C., WEI-YU, T., LU, J. G., 2004. ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property, Applied Physics Letters, Volume: 85, Issue:24, 5923 – 5925.
- ZHUGE, F., ZHU, L. P., YE, Z. Z., MA, D. W., LU, J. G., HUANG, J. Y., WANG, F. Z., JI, Z. G., ZHANG, S. B., 2005. ZnO *p-n* homojunctions and ohmic contacts to Al-N-co-doped *p*-type ZnO, Applied Physics Letters, Volume:87.