



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

CO₂ Gaz Sensörü Uygulamaları için CuO İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu

 Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL^{a,*},  Enes NAYMAN^a

^a Tasarım Bölümü, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: fatih.gozukizil@bilecik.edu.tr

DOI:10.29130/dubited.1184293

ÖZ

Katma değeri yüksek, ileri teknoloji ve yüksek maliyet gerektiren malzemelere alternatif olarak ince film kaplama yöntemleri ile eşdeğer yüzey özelliklerine sahip ekonomik malzemeler üretilebilmektedir. İnce film biriktirme yapılarak farklı sensörler, fotovoltaik hücreler, elektronik uygulamalar ve filtreler gibi çeşitli teknolojik malzemelerin temelini oluşturan yarı iletken yüzeyler üretmek mümkündür. Çeşitli fosil yakıtlar ve atıkların yanması ile farklı gazlar açığa çıkmaktadır. Çevreye zarar vermekte ve sağlığa olumsuz etkileri olan bu gazların tespit edilmesi gerekmektedir. CuO yarıiletken ince filmler karbondioksit, etanol, amonyak gibi farklı gazların belirlenmesi ve gerekli uyarıların verilmesinde gaz sensörü olarak kullanımı amacı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında cam yüzeyler üzerine CuO yarıiletken ince filmler biriktirilerek gaz sensörü olarak kullanımı test edilmiştir. CuO yarı iletken ince filmlerin CO₂ gazının tespitinde alternatif bir gaz sensörü olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CuO, İnce Film, Gaz Sensörü, Daldırarak Kaplama, Yarıiletken

Production and Characterization of CuO Thin Films for CO₂ Gas Sensor Applications

ABSTRACT

As an alternative to materials with high added value, requiring advanced technology and high cost, economical materials with equivalent surface properties can be produced by thin film coating methods. It is possible to produce semiconductor surfaces that form the basis of various technological materials such as different sensors, photovoltaic cells, electronic applications and filters by thin film deposition. Different gases are released with the combustion of various fossil fuels and wastes. These gases, which harm the environment and have negative effects on health, need to be determined. Studies are carried out on the use of CuO semiconductor thin films as gas sensors for the determination of different gases such as carbon dioxide, ethanol, ammonia. In this study, CuO semiconductor thin films were deposited on glass surfaces and its use as a gas sensor was tested. It has been determined that CuO semiconductor thin films can be used as an alternative gas sensor in the detection of CO₂ gas

Keywords: CuO, Thin Film, Gas Sensor, Dip Coating, Semiconductor

I. GİRİŞ

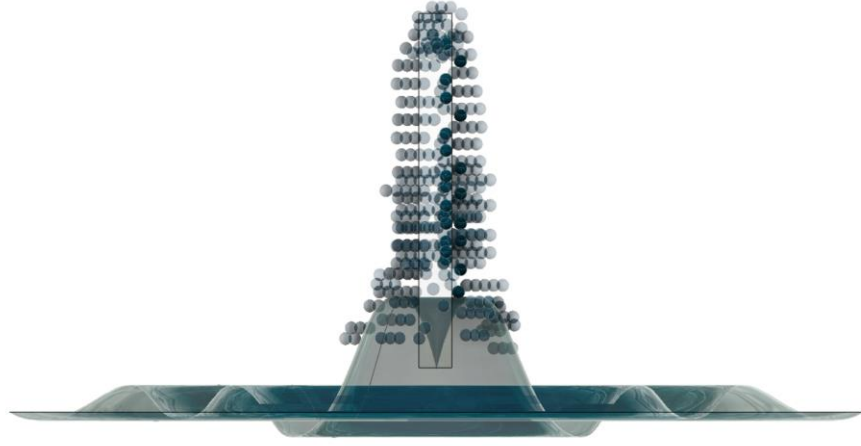
Yarıiletken malzemeler endüstriyel ve teknolojik birçok uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin kaynaklarının sınırlı, nitelikli cihazlara ihtiyaç duyulması, yatırım ve üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle malzemelerin tamamını kullanmak yerine ekonomik malzemelerin yüzeyleri ince film yöntemleri ile kaplanarak yarı iletken özellik kazandırma süreci tercih edilmektedir. ZnO [1][2], SnO₂ [3][4], NiO [5][6], WO₃ [7][8], CdO[9][10] ve CuO[11][12] gibi metal oksitlerin uygun altlıklar üzerinde biriktirilmesi ile üretilen yarıiletken ince filmlerin gaz sensörü uygulamalarında kullanılması araştırılmaktadır. Yüzeyler üzerine biriktirilen CuO ince filmler etanol, aseton [13][14], azot oksitler [15], karbon dioksit [16], amonyak [17] karbon monoksit [18] gibi farklı gazların tespit ve algılanmasında gaz sensörü olarak umut vaat etmektedir. Petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtların, endüstriyel ve evsel atıkların yanmasından açığa çıkan CO₂ gazı havadaki oksijeni hızlı tüketilmesi ile doğaya zarar vermekte ve yüksek konsantrasyonlarda ise insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle CO₂ gazının algılanması ve ortamdaki yoğunluğunu tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kaplama malzemesi olarak metal oksitlerden, düşük maliyetli, zehirli olmayan kolay elde edilebilen CuO, atık olarak pürüzsüz ucuz ve yaygın olarak kullanılan cam malzeme tercih edildi. Cam altlıklar yüzeyine CuO ince film biriktirme işlemi her boyutta ve şekildeki altlıklara kaplama yapılabilen ayrıca hemen hemen her metal oksitle çalışılabilen daldırarak kaplama yöntemi ile yapıldı. Cam yüzeylere kaplanan CuO ince filmlerin yapısal özellikleri X-Işını Kırınımı (XRD) cihazıyla, yüzey özellikleri Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskopu (FESEM) ile karakterize edildi. Üretilen ince filmlerin yarı iletken özellikleri ve gaz sensörü olarak kullanılabilirliği test edildi. CuO yarı iletken ince filmlerin alternatif olarak CO₂ gaz sensörü olarak kullanılabilirliği gözlemlendi.

II. MATERYAL VE METOT

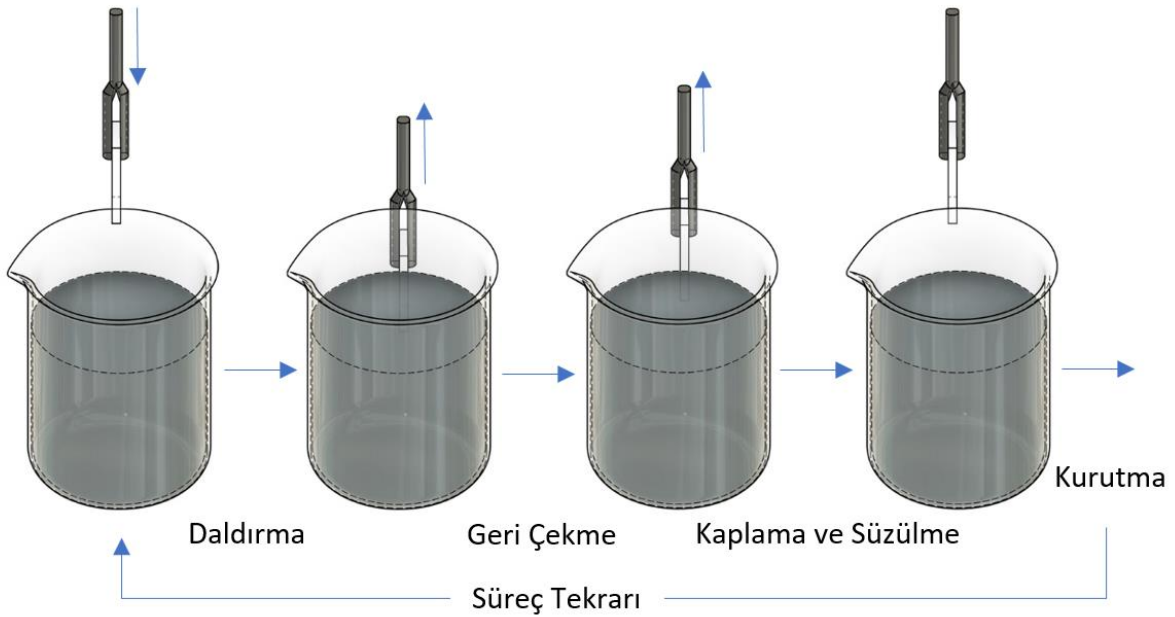
A. DENEYSEL DETAYLAR

Çalışmamız kapsamında, daldırarak kaplama yöntemiyle cam altlıklara CuO ince filmleri biriktirme işlemi için hazırlanan başlangıç çözeltisinde; reaktif olarak bakır (II) asetat monohidrat (Cu(CO₂CH₃)₂·H₂O) tozu, çözeltiyi oluşturan çözücü olarak 2- metoksietanol (CH₃OCH₂CH₂OH) ve stabilizatör olarak monoetanolamin (NH₂CH₂CH₂OH) kullanıldı. İlk olarak başlangıç çözeltisi belirlenen 0.3M konsantrasyona göre ayarlanan bakır (II) asetat monohidrat tozu, 250 ml 2-metoksietanol içerisinde 750 rpm hızla manyetik karıştırıcıyla 2 saat karıştırılarak çözüldü ve damla halinde monoetanolamin eklenerek hazırlandı. Hazırlanan çözelti 24 saat oda sıcaklığında dinlendirildi ve kaplama çözeltisi olarak kullanıldı. Kaplama çözeltisi ile ince film kaplamalar için 1 mm kalınlığında cam altlıklar 2 cm x 2 cm boyutlarda ayarlandı. Cam altlıklar deiyonize suyla temizlenip 150 °C’de kurutuldu.



Şekil 1. Cam altlığın kaplama çözeltisine daldırma işleminin şematik gösterimi

Kaplamaya hazır hale getirilen cam altıklara kaplama çözeltisine daldırma işleminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Yüzeyi kaplanacak olan altlık numunesi belirli bir konsantrasyonda hazırlanan akışkan film çözeltisinin içerisine daldırılır. Altlık yüzeyine çözeltinin viskozitesine bağlı olarak değişen oranlarda tutunmalar başlamaktadır. Çözelti içerisinden belirli bir hızla geri çekilen altlık numunesi üzerindeki akışkan filmin bir kısmı adezyon kuvvetinin etkisi ile katı altlık numune yüzeyine tutunmakta, fazla kalan kısım ise yer çekimi ve kohezyon kuvvetlerinin etkileriyle çözelti içerisine geri dökülmektedir. Film kaplama işleminin istenilen özelliklerine göre bu kuvvetlere müdahale etmek mümkündür. Altlık madde ve kaplanacak maddenin birbirine bağlanması, daldırma sonrası altlığın çözelti içerisinden geri çekme hızı, süzülme süreci, kurutma/tavlama süre ve sıcaklıkları gibi değişkenler yüzeyde biriktirilen film kalitesini ve kalınlığını etkileyen en önemli faktörlerdendir. En verimli tutunma süreci altlık numunesinin çözelti içerisinden çıkarılıp, süzülme, kurutma ve tavlama işlemleri tamamlandığı zaman gerçekleşmektedir. Tavlama işleminin öncesinde gerçekleşen döngü çoklu olarak uygulanabilmektedir.



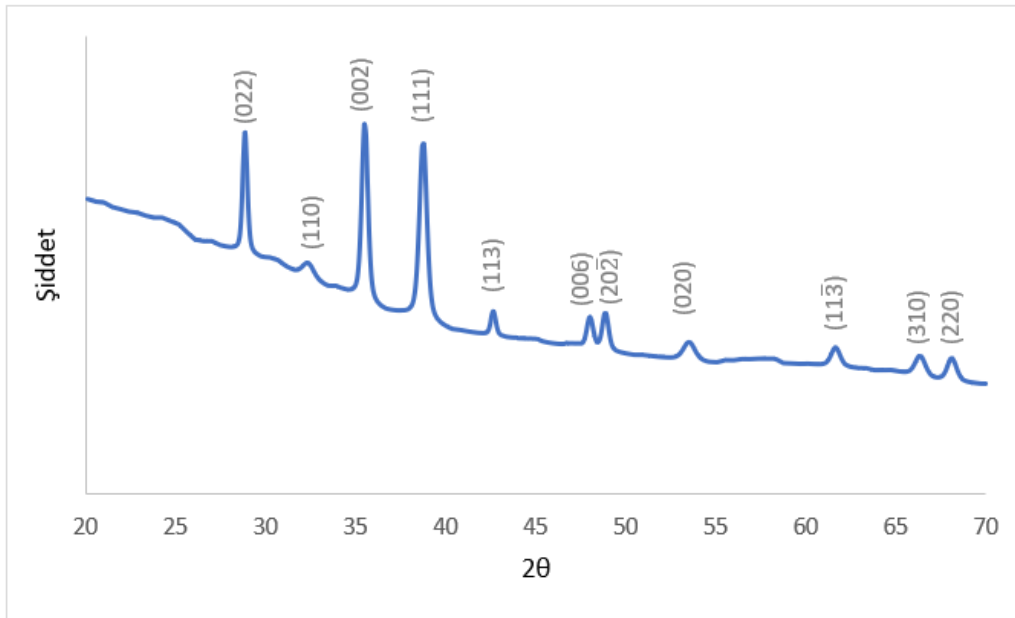
Şekil 2. Daldırarak kaplama yöntemi süreci

Daldırarak kaplama yöntemi süreci Şekil 2’de gösterilmektedir. Öncelikle temizlenen cam altlıklar hazırlanan CuO kaplama çözeltisine tutucu yardımıyla sabit hızla daldırıldı. Cam altlıklar, çözelti içerisinde 30sn, 60sn ve 90sn olarak 3 farklı sürede bekletilerek ön denemeler yapıldı. Yapılan ön denemeler sonucunda; 30 sn süreyle bekletmenin yüzeyin tamamen kaplanması için yeterli olmadığı ve 90 sn süreyle bekletmenin ise gereğinden fazla olduğu düşünülerek, çözelti içerisinde altlıkların bekletilme süresi 60 sn. olarak belirlendi. Çözelti içerisinden aynı sabit hızla geri çekildi. Fazla kaplama çözeltisinin yüzeyden süzülmesi için 30 sn. bekletildikten sonra kurutma işlemine alındı. Kurutma işlemi 150 °C sıcaklıkta 120 sn. süreyle yapıldı. Her kat kaplama için aynı süreç tekrar edildi. 3,6 ve 9 süreç tekrarı denemeleri yapıldı. 3 kat denemelerinde CuO yapısının cam altlık üzerinde film oluşturmaya başladığı fakat yüzeyin tamamen kaplanmadığı gözlemlendi. 9 kat denemelerinde ise altlıklar üzerinde CuO yapısının aşırı biriktiği ve yığılmaların olduğu gözlemlendi. Tartım metoduna göre 9 kat biriktirilen filmlerin kalınlığı yaklaşık 1 mikron olduğu hesaplandı. İstenilenden daha kalın filmler elde edildiği, ince film olmadıkları tespit edildi. CuO saydam iletken oksit olduğundan UV-Vis Spektroskopisi ölçümleri sonucunda film numunelerinin transparanlığında belirgin bir şekilde azalma gözlemlendi. Bu da 9 kat filmlerin istenilenden daha kalın olduğunu göstermektedir. Optimum süreç tekrar sayısı 6 olarak belirlendi. CuO yapısının yüzeyde kristalleşmesinin tamamlanması için 350°C, 400°C ve 450°C sıcaklıklarda tavlama ön denemeleri yapıldı. 450 °C sıcaklığın altında yapılabilecek tavlama denemelerinde yüzeyde kristalleşmenin tamamen gerçekleşmediği tespit edildi. Ön denemeler ve daha önce yapılan çalışmalar incelenerek, CuO ince filmler için tavlama sıcaklığı 450 °C olarak belirlendi.

III. BULGULAR

A. İNCE FİLM KARAKTERİZASYONU

Cam altlıklar üzerine 6 kat biriktirilen ve 450 °C sıcaklıkta tavlanan CuO ince filmlerin yapısal özellikleri Panalytical Empryan X-Işını Kırınımı (XRD) cihazı ile karakterize edildi.



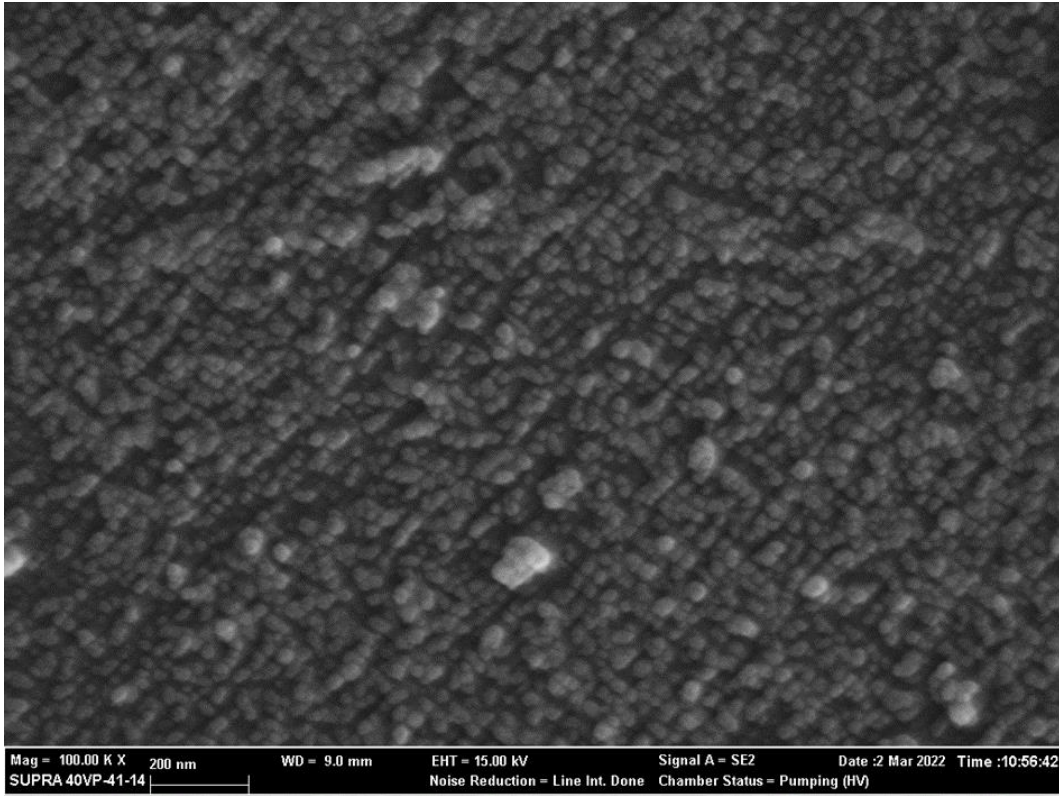
Şekil 3. CuO ince filmlerin XRD analiz spektrumu

Üretilen CuO filmlere ait XRD spektrumu (2θ açısı; 20°-70°aralığında, tarama hızı: 2 derece/dakika, CuKα ışını: 1.5406 Å dalga boyunda) Şekil 3’te verildi. XRD spektrumu incelendiğinde CuO filminin

en yüksek pik şiddeti 35.5 kırınım açısında tenorit fazda (0 0 2) piki olarak belirlendi. Tenorit fazda CuO yapısına ait 38.6, 48.9, 61.3 ve 66.1 kırınım açılarında sırasıyla (1 1 1), (2 0 $\bar{2}$), (1 1 $\bar{3}$) ve (3 1 0) pikleri tespit edildi. Ayrıca bakır dioksit yapısına ait 28.2, 42.7, 47.8 ve 68.7 2θ açılarında sırasıyla (0 2 2), (1 1 2), (0 0 6) ve (2 2 0) pikleri gözlemlendi. XRD spektrum verileri analiz edilerek, Scherrer formülüyle yarı pik genişlikleri (FWHM) değeri için CuO yapısının ortalama tane boyutu hesaplanarak Tablo 1 de verildi.

Tablo 1. CuO filmlerin yarı pik genişliği ve tanecik boyutu

	FWHM	D (nm)
CuO	0.36	26.37

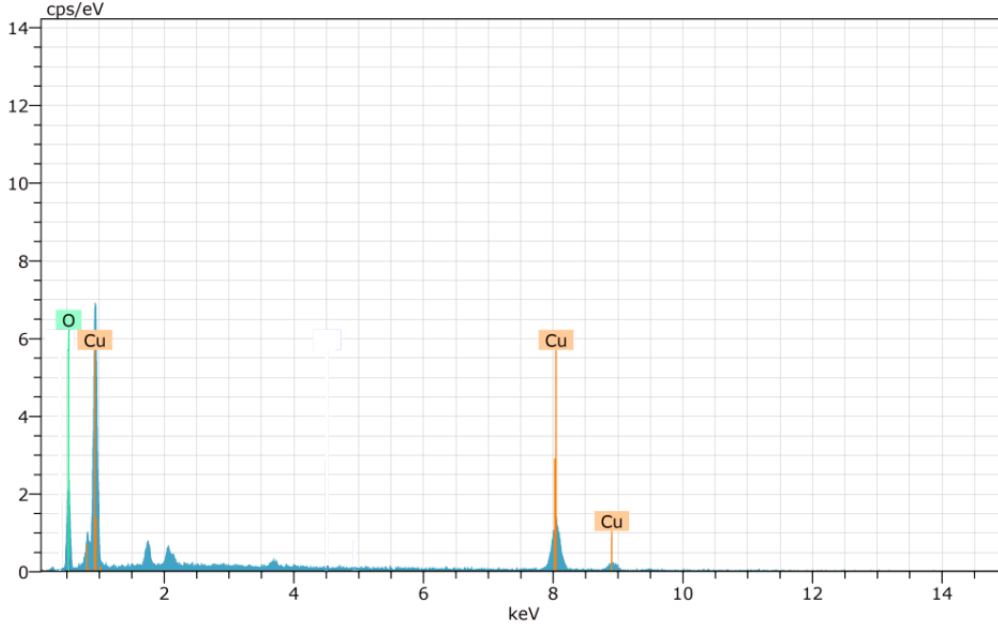


Şekil 4. CuO ince filmlerin 100 kx büyütme FESEM görüntüleri

Cam substratlar üzerinde biriktirilen CuO ince film numunelerinin morfolojik yapısı Zeiss Supra 40VP Alan Emisyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile incelenmiştir. Şekil 4'te verilen FESEM görüntüleri incelendiğinde, CuO yapısının cam altlık yüzeyinin tümüne hemen hemen eşit şekilde yayıldığı, nano boyutta taneciklerin oluştuğu belirlenmiştir. Yüzeyde aşırı birikme ve yığın oluşumu görülmemektedir. Ayrıca yüzeyde tanecikler arası boşlukların az olduğu taneciklerin birbirine iyi tutunduğu dolayısıyla film oluşumunun düzgün olduğu gözlemlenmektedir. 100 kx büyütme ve 200 nm ölçekli görüntüler incelendiğinde tanecik boyutunun ortalama 25nm olduğu ve bu da XRD spektrumundan hesaplanan tane boyu ile yakın değerlerde olup birbirini destekler niteliktedir.

Tablo 2. CuO ince filmlere ait EDX sonuçları

	Bakır (Cu) Atomca Yüzde (%)	Oksijen (O) Atomca Yüzde (%)
CuO	63,21	36,79



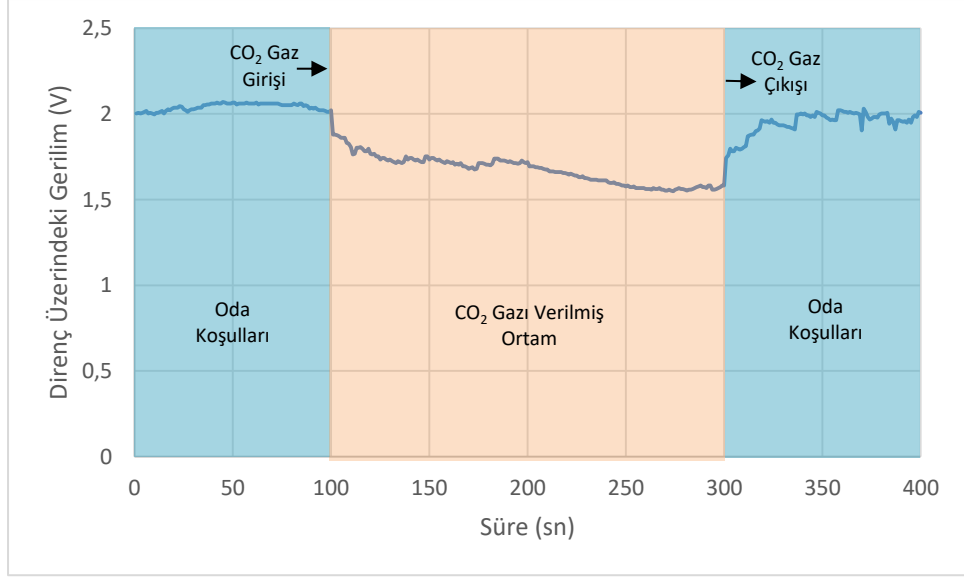
Şekil 5. CuO ince filmlerin EDX spektrumu

Morfolojik yapısı incelenen CuO ince filmlerin taramalı elektron mikroskobuna bağlı Bruker marka enerji dağılımlı X-Işını spektrometresi (EDX) dedektörü kullanılarak, Şekil 5'te gösterilen CuO ince filmlerin EDX spektrumundan kimyasal bileşimleri ele edildi. Tablo 2 'de verilen CuO ince filmlere ait EDX sonuçlarına göre yüzeyde CuO yapısının olduğu görülmektedir.

Üretilen CuO filmlerin optik özellikleri Perkin Elmer Lambda 25 cihazı ile incelenmiştir. 300-1100 nm dalga boylarında alınan UV-Vis Spektroskopisi ölçümleri verileri kullanılarak bant yapısı tespit edilen filmlerin Tauc metodu ile yasak enerji aralıkları 1,97 eV olarak hesaplanmıştır.

B. GAZ SENSÖR UYGULAMALARI

Çalışma kapsamında karakterize edilen CuO ince filmlerin gaz sensörü uygulamalarında kullanımı test edilmiştir. Bir kontrol kartı üzerine, güç kaynağı, dirençler ve sensör bağlantıları yapılarak gaz sensörü gaz algılama ve kontrol sistemi kurulmuştur. Güç kaynağı sisteme bağlanan yarıiletken gaz sensörüne 5 V sabit gerilim vermektedir. Sensör üzerinden geçerek direnç üzerine gelen gerilim değişimi analog bilgi olarak ölçülür ve kontrol kartı tarafından dijital bilgiye dönüştürülür. Elde edilen veriler incelenerek yarı iletkenlik ve ortamda bulunan gaza tepkileri belirlenmektedir. Modüler olarak planlanan sistem tekrardan farklı sensöre göre programlanabilir ve ayrıca ses ışık gibi sensör uyarı mekanizmaları eklenebilir.



Şekil 6. CuO ince filmlerin CO₂ gaz sensörü uygulamaları

Oluşturulan sisteme gaz sensörü olarak bağlanan cam yüzeyler üzerine 6 kat biriktirilen ve 450 °C sıcaklıkta tavlanan CuO yarı iletken ince filmlerin gaz tespiti ve hassasiyeti ölçme çalışmaları yapılarak, elde edilen veriler Şekil 6'da gösterilmiştir. Hazırlanan izole gaz odası içerisine CuO gaz sensörleri yerleştirildi. Sensör üzerine 5V sabit akım verilerek yarıiletken özellikleri belirlendi. Öncelikle, 100 sn boyunca normal oda koşullarında sensör üzerindeki dirençten ölçülen gerilim değerinin 2V civarında olduğu gözlemlendi. Bu üretilen CuO ince filmlerin yarı iletken olduğunu ifade etmektedir. Gaz sensörü uygulamaları için, 100 sn sonra ortama CO₂ gazı verildi. Sonrasında 200 saniye boyunca sabit konsantrasyonda ortama verilen CO₂ gazına sensörün tepkisi ölçüldü. Normal oda koşullarında ortama ilave gaz verilmediğinde 2V civarında olan sensör üzerindeki direnç gerilim, CO₂'nin etkisiyle yaklaşık 1,5V'a kadar düşmüştür. Bu ,sensörün bulunduğu ortama ilave CO₂ gazı verildiğinde sensör direnci üzerindeki gerilim değişimi, CO₂ gaz sensörü olarak kullanım için uygun olduğunu göstermektedir. Sonraki 100 sn boyunca ortamdan CO₂ gaz girişi kesildiğinde sensörden alınan gerilim değerinin gazsız ortamdaki ilk haline yakın değerlere döndüğü gözlemlendi. Bu sensörün tekrarlanabilir şekilde kullanım için uygun olduğu anlamına gelmektedir. Cam yüzeyler üzerine 3 kat biriktirilen ve 450 °C altında tavlanan CuO ince filmler yarı iletkenlik özelliği göstermedi ve gaz sensörü olarak kullanımı test edilemedi. 9 kat biriktirilen numunelerde ise yığılmalar ve oluşan döküntülerden kaynaklı yüzeyde kopukluklar oluştu. Homojen filmler elde edilemedi ve tüm yüzey yarı iletkenlik göstermedi. Bölgesel olarak yarı iletkenlik göstermesi sensör uygulamalarında kullanımı için uygun görülmedi.

Daldırarak kaplama metodu ile CuO filmlerin biriktirilmesi için cam ve seramik gibi sert yüzeylerin yanı sıra, iplik ve kumaş gibi esnek tekstil yüzeylerinin altlık olarak kullanımı mümkündür. Endüstriyel uygulamalarda; giyilebilir teknolojiler için esnek altlıklar, geleneksel sensör üretimleri için ise sert altlıkların kullanılabilmesi düşünülmektedir. Kullanılan cam altlıklara yapılan kaplamadan, seramik yüzeylerin sırlı veya sırsız olmasına göre, esnek yüzeylerde ise malzemenin emiciliğine göre kaplamalarda farklılıklar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

IV. SONUC

Kaplanacak yüzey olarak belirlenen cam yüzeyler üzerine CuO ince film biriktirme için sol-gel daldırma yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda; daldırma süresi 60 sn., daldırma tekrarı 6 kat, süreç arası kurutma 150 °C’de 120 sn. süresince ve tavlama sıcaklığı 450 °C optimum ince film kaplama parametreleri olarak belirlendi. 450 °C tavlama sıcaklığının altındaki denemelerde ince film yapısının yüzeyde kristalleşmediği ve üretilen ince filmlerin yarı iletken özellik göstermediği tespit edildi. 3 katlı denemelerde kaplamanın yetersiz olduğu, kat sayısının artırılarak 9 kat olduğunda ise yüzeyde yığılmaların arttığı ve döküntülerin oluştuğu görüldü. Bu da ince film kalınlığını arttırdığı ve yüzeyde homojen film yapısının oluşmadığını göstermektedir. Gaz sensör uygulamalarında tüm yüzeyde iletkenlik görülmedi.

Optimum belirlenen parametrelerde kaplaması yapılan numunelerin yapısal özellikleri incelendiğinde en yüksek pik şiddeti 35.5 kırınım açısında tenorit fazda (0 0 2) piki olarak belirlendi, yüzeyel özellikleri incelendiğinde yüzeyde ortalama 25 nm tanecik boyutunda CuO yapıları gözlemlendi. XRD verileri ve FESEM görüntüleri incelendiğinde birbirlerini destekler nitelikte olduğu görüldü. CuO yarı iletken ince filmin yüzeyde homojen bir dağılım sergilemesi ve tanecikler arası boşlukların az olması, sensör testleri sırasında sensör direnci üzerindeki gerilimin kesintisiz iletilmesini sağladı. Gaz odasına ortama CO₂ gazı verildiğinde, yerleştirilen numunelerine bağlı direnç üzerindeki gerilimin değişmesiyle CuO ince filmlerin CO₂ gaz sensörü olarak kullanabildiğini gösterdi. Sensör direnci geriliminin, ortama verilen gaz girişi kaldırıldığında ilk haline dönmesiyle sensörün tekrarlanabilir olarak çalışılabilir olduğu belirlendi.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Zhao, Y. Shen, X. Yan, P. Zhou, Y. Yin, R. Lu, C. Han, B. Cui, and D. Wei, “Complex-surfactant-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional ZnO nanorods for high-performance ethanol gas sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 286, pp. 501–511, May 2019.
- [2] J. Liu, L. Zhang, J. Fan, B. Zhu, and J. Yu, “Triethylamine gas sensor based on Pt-functionalized hierarchical ZnO microspheres,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 331, p. 129425, Mar. 2021.
- [3] P. G. Choi, N. Izu, N. Shirahata, and Y. Masuda, “Improvement of sensing properties for SnO₂ gas sensor by tuning of exposed crystal face,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 296, p. 126655, Oct. 2019.
- [4] Y. Kong, Y. Li, X. Cui, L. Su, D. Ma, T. Lai, L. Yao, X. Xiao, and Y. Wang, “SnO₂ nanostructured materials used as gas sensors for the detection of hazardous and flammable gases: A review,” *Nano Mater. Sci.*, vol. 4, no. 4, pp. 339–350, Dec. 2022.
- [5] U. T. Nakate, R. Ahmad, P. Patil, Y. T. Yu, and Y. B. Hahn, “Ultra thin NiO nanosheets for high performance hydrogen gas sensor device,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 506, p. 144971, Mar. 2020.
- [6] P. Li, C. Cao, Q. Shen, B. Bai, H. Jin, J. Yu, W. Chen, and W. Song, “Cr-doped NiO nanoparticles as selective and stable gas sensor for ppb-level detection of benzyl mercaptan,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 339, p. 129886, Jul. 2021.
- [7] Y. Gui, K. Tian, J. Liu, L. Yang, H. Zhang, and Y. Wang, “Superior triethylamine detection at room temperature by (-112) faceted WO₃ gas sensor,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 380, p. 120876, Dec. 2019.

- [8] Q. Hu, J. He, J. Chang, J. Gao, J. Huang, and L. Feng, "Needle-Shaped WO_3 Nanorods for Triethylamine Gas Sensing," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 3, no. 9, pp. 9046–9054, Sep. 2020.
- [9] U. T. Nakate, P. Patil, B. Ghule, Y. T. Nakate, S. Ekar, R. C. Ambare, and R. S. Mane, "Room temperature LPG sensing properties using spray pyrolysis deposited nano-crystalline CdO thin films," *Surfaces and Interfaces*, vol. 17, p. 100339, Dec. 2019.
- [10] F. M. Othman, A. A. A. Hamead, and M. H. A. Wahid, "Fabrication and Characterization of CdO Gas Sensor with Tube Shape," *Mater. Sci. Forum*, vol. 1021, pp. 317–326, 2021.
- [11] H. Bai, H. Guo, J. Wang, Y. Dong, B. Liu, Z. Xie, F. Guo, D. Chen, R. Zhang, and Y. Zheng, "A room-temperature NO_2 gas sensor based on CuO nanoflakes modified with rGO nanosheets," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 337, p. 129783, Jun. 2021.
- [12] L. Hou, C. Zhang, L. Li, C. Du, X. Li, X. F. Kang, and W. Chen, "CO gas sensors based on p-type CuO nanotubes and CuO nanocubes: Morphology and surface structure effects on the sensing performance," *Talanta*, vol. 188, pp. 41–49, Oct. 2018.
- [13] V. Ambardekar, T. Bhowmick, P. P. Bandyopadhyay, and S. B. Majumder, "Ethanol and acetone sensing properties of plasma sprayed copper oxide coating," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 160, p. 110333, Jan. 2022.
- [14] T. Hemalatha, S. Akilandeswari, T. Krishnakumar, S. G. Leonardi, G. Neri, and N. Donato, "Comparison of Electrical and Sensing Properties of Pure, Sn- and Zn-Doped CuO Gas Sensors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 3, pp. 903–912, Mar. 2019.
- [15] J. M. Rzaij and N. F. Habubi, "Room temperature gas sensor based on La_2O_3 doped CuO thin films," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 126, no. 7, pp. 1–10, Jul. 2020.
- [16] T. Bhowmick, A. Ghosh, S. Nag, and S. B. Majumder, "Sensitive and selective CO_2 gas sensor based on CuO/ZnO bilayer thin-film architecture," *J. Alloys Compd.*, vol. 903, p. 163871, May 2022.
- [17] G. Chaloeipote, R. Prathumwan, K. Subannajui, A. Wisitsoraat, and C. Wongchoosuk, "3D printed CuO semiconducting gas sensor for ammonia detection at room temperature," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 123, p. 105546, Mar. 2021.
- [18] A. Rydosz, "Amorphous and nanocrystalline magnetron sputtered CuO thin films deposited on low temperature cofired ceramics substrates for gas sensor applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 5, pp. 1600–1607, 2014.