

Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları

Tayyar GÜNGÖR^{1*}, Ayşegül KILIÇASLAN¹, Ebru GÜNGÖR¹

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

Geliş Tarihi (Received): 18.03.2023, Kabul Tarihi (Accepted): 21.05.2023

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): tgungor@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132770 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Bu çalışmada, yarıiletken aygıt karakterizasyonu için ortam sıcaklığı gibi farklı fiziksel ortam-koşullara bağlı olarak 0.1 nA-10 mA aralığında düşük akım değerlerini ölçmek amacıyla düşük maliyetli ve uygulama kolaylığı olan bir elektrometre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan logaritmik yükselteç ve mikrokontrolcü ile bu tasarım, örnek sıcaklığı ve düşük akımların aynı anda ölçülmesine izin vermektedir. Yeni elektrometre sisteminin testleri, ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile hazırlanan ZnO yarıiletken filmin 300-450 K sıcaklık aralığında karanlık akım ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yapısal, optik ve yüzeysel özellikleri de incelenen ZnO filmin yüzeyine Al buharlaştırılarak elektriksel ölçümler için gereken iletken kontaklar (elektrot) oluşturulmuştur. Al buharlaştırma işlemi kullanılan maskenin boyutlarına bağlı olarak belirlenen geometrik faktör ve ölçülen akım değerlerinden filmin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi elde edilmiştir. Karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, tasarlanan yeni elektrometrenin ticari elektrometreye göre daha ucuz ve daha esnek bir kullanıma sahip olduğunu göstermektedir. Yeni sistem lisans ve lisansüstü öğrencileri ile birlikte araştırmacıların eş-zamanlı olarak ışık şiddeti ve hatta neme bağlı elektriksel iletkenlik ölçümlerinde oldukça kullanışlıdır.

Anahtar Kelimeler: Arduino-UNO, elektrometre, logaritmik yükselteç, metal oksit

Arduino-Based Electrometer Design and Metal Oxide Semiconductor Applications

ABSTRACT

In this study, a low-cost and easy-to-apply electrometer design was carried out to measure low current values in the range of 0.1 nA-10 mA depending on different physical environmental conditions such as ambient temperature for semiconductor device characterization. With the logarithmic amplifier and microcontroller used, this design allows simultaneous measurement of sample temperature and low currents. The tests of the new electrometer system were carried out by making dark current measurements in the 300-450 K temperature range of the ZnO semiconductor film prepared by ultrasonic chemical spraying technique. In the study, the conductive contacts (electrode) required for electrical measurements were formed by evaporating Al on the surface of the ZnO film, whose structural, optical and surface properties were also examined. The variation of the electrical conductivity of the film depending on the temperature was obtained from the geometric factor and the measured current values determined depending on the dimensions of the mask used in the Al evaporation process. Comparative experimental results show that the designed new electrometer is cheaper and more flexible to use than the commercial electrometer. The new system is very useful for undergraduate and graduate students and researchers to simultaneously measure light intensity and even moisture-induced electrical conductivity.

Keywords: Arduino-UNO, electrometer, logarithmic amplifier, metal oxide

GİRİŞ

Genellikle nükleer bilim, uzay bilimi, vakum teknolojisi, malzeme araştırmaları ve yarıiletken malzeme karakterizasyonları gibi çalışmalarda ortaya çıkan pA, nA ve μ A mertebesindeki akımları ölçmek için elektrometre kullanılmaktadır (Acharya ve Vyavahare, 2000; Rajput ve Jamuar, 2002; Rajput, 2003; Acharya, 2006). Yarıiletken malzeme tabanlı aygıt teknolojilerinde özel bir yeri olan MOSFET'lerin elektriksel ölçümleri için bazı önemli hususlar vardır (Chui ve ark., 2006; Evangelou ve ark., 2007). Belirli bir kalınlıkta genellikle silikon dioksit kullanan gelişmiş bir MOS (metal oksit yarıiletken) cihazı için, yalıtıktan geçen akım birkaç yüz pA ile mA arasında değişim göstermektedir. Genel olarak silikon dioksit-tabanlı belirli bir kalınlığa sahip gelişmiş bir MOS cihazı için, yalıtkan kısımdan geçen akım birkaç yüz pA ile mA arasında değişim göstermektedir (Khairurrijal ve ark., 2000a; Khairurrijal ve ark., 2000b). LOG-112 isimli logaritmik yükselteç kullanılarak tasarlanan bir düşük akım ölçüm sistemi (Khairurrijal ve ark., 2007) bu çalışmaya temel olarak dikkate alınmıştır. LOG-112 birimi, merteye başına 0,5 V üretirken LOG-114 merteye başına 0,375 V üretmektedir (URL-1, 2023). Bu çalışmada C8051F006 mikrokontrolcü yerine son zamanlarda oldukça ilgi çeken ve çok geniş kullanım alanlarına sahip Arduino-tabanlı bir mikrokontrolcü olan UNO ve 7,5 mertebede (100 pA - 10 mA) akım ölçüm kapasitesi olan LOG-114 entegresi kullanılmıştır (URL-2, 2023).

Metal oksit tabanlı malzemeler son 25 yıldır üzerinde en çok araştırma yapılan geniş band aralıklı yarıiletkenlerdir. Metal oksit grubun en popüler üyesi olan ZnO, geniş band aralığına sahip saydam iletken oksit olarak bilinmektedir. Optoelektronik uygulamalarda çeşitli metal elementlerin katkılarıyla elde edilmiş ZnO ince filmlerin optik ve yapısal özelliklerinin değişimi ile ilgili çeşitli araştırmalar vardır (Wang ve ark., 2002; Du ve ark., 2003; Abu EL-Fadl ve ark., 2005; Fay ve ark., 2005; Yıldırım ve ark., 2005). Bu tür malzemeler cam, kuvars, ZnO gibi alt tabanlar (alttaş) üzerine olduğu gibi n-Si ve/veya p-Si tabakalar üzerine biriktirilerek de

aygıt özellikleri incelenmektedir (Aydın Yıldırımlar, 2014). Bu yarıiletkenler; radyofrekans magnetron ko-partma (rf-magnetron sputtering), kimyasal buhar çöktürme (chemical vapour deposition), ultrasonik kimyasal püskürtme (ultrasonic spray pyrolysis), sol-gel aktif-reaktif buharlaştırma (sol-gel activated reactive evaporation), iyon demeti yardımı ile çöktürme (ion beam assisted deposition), püskürtme, süblimleşme, lazer çöktürme, hidrotermal teknikler, katodik ark çöktürme, elektron-siklotron rezonans (ECR) püskürtme gibi çeşitli teknikler ile hazırlanabilmektedir (Chopra ve ark., 1983; Vigil ve ark., 2000; Atay, 2001; Bougrine ve ark., 2003; Bilgin, 2003).

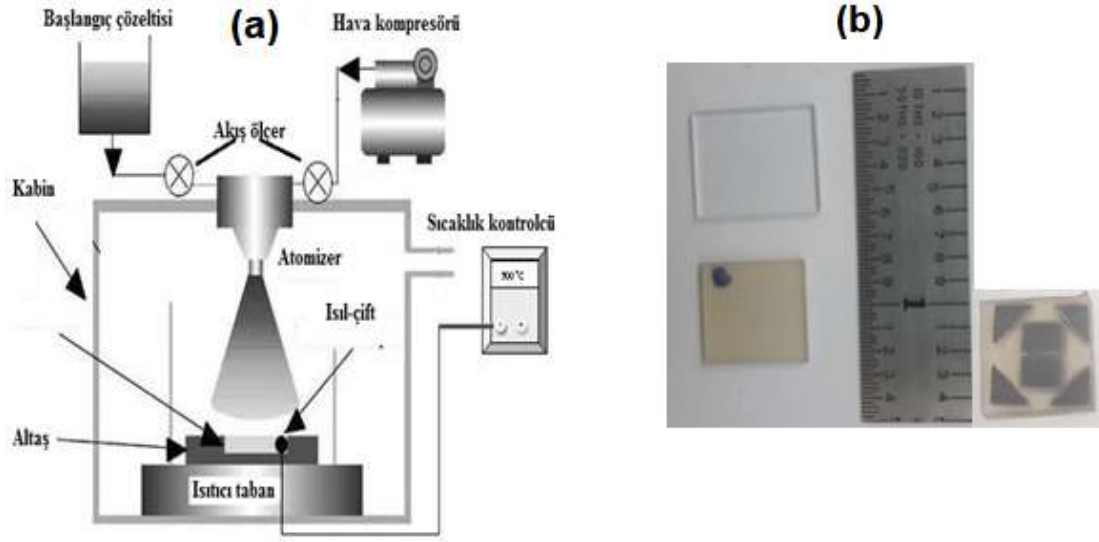
Bu çalışmada, alttaş olarak kullanılan mikroskop cam üzerine ZnO ince film biriktirmek için Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) sistemi kullanılmıştır. ZnO ince filmin elektriksel ölçüm sonuçları, filmin optik, yapısal ve yüzeysel ölçüm sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Daha sonra logaritmik yükselteç (LOG-114), Arduino-UNO ve sıcaklık ölçme biriminin entegrasyonu ile gerçekleştirilerek tasarlanan elektrometre ile ZnO ince filmin sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu tamamlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bu çalışmada, UKP sistemi (Yıldırımlar, 2014) kullanılarak cam alttaş üzerine ZnO ince film kaplanmıştır (Şekil 1a). UKP sisteminde, osilatör olarak 100 kHz'lik atomizer bulunmaktadır. ZnO ince film için %99,9 safılıkta (Merck) çinko-asetat tuzu ($Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot 2H_2O$) metanol içerisinde çözülerek elde edilen başlangıç çözeltisi kullanılmıştır. Kristalleşmeyi engellemek ve homojenliği sağlamak için çözelti 50°C belirli bir sürede karıştırılmıştır. Vakum altında çalışan bir metal buharlaştırma sistemiyle film yüzeyinde uygun geometri-lerde Al metalinin buharlaştırılmasıyla elektriksel kontaktlar oluşturulmuştur (Şekil 1b).

Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları



Şekil 1. a. UKP sisteminin blok diyagramı, **b.** cam alttaş (sol üst), alttaş üzerine biriktirilen ZnO ince film (sol alt) ve Al-elektrot buharlaştırıldıktan sonraki film yüzeyi (sağ alt)

Biriktirilen ince filmin 300-1000 nm dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik spektrumu Optizen 3220 model UV-VIS Spektrofotometre ile elde edilmiştir. ZnO yarıiletken filmin morfolojik ve elementel analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI Quanta FEG 250 with an energy dispersive detector) kullanılmıştır. Film malzemenin yapısal karakterizasyonu için elde edilen X-ışını kırınım (XIK) deseni için RIGAKU RINT 2000 kırınım metre ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1,54056 \text{ \AA}$) kullanılmıştır. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde ZnO ince filmin sıcaklığı 300 – 450 K arasında, K-tipi ısı çift ve sıcaklık kontrolcü yardımı ile değiştirilmektedir. Ayrıca ikinci bir K-tipi ısı çift ile örnek sıcaklığı mikrokontrolcü yardımı ile kayıt altına alınmaktadır. Buradaki çalışmalarda örnek malzemenin sıcaklık değişimleri ve ölçümlerinin kontrol edildiği birim ile tasarımı gerçekleştirilen mikrokontrolcü-tabanlı elektrometre birbirine entegre edilerek kullanılmıştır. Böylece her bir sıcaklık değerinde örnek içinden geçen akım değeri ölçülerek kayıt altına alınabilmektedir.

Yöntem

Ohm yasasına göre, uçları arasına uygulanan potansiyel farkının malzemenin içinden geçen akıma oranı o malzemenin direnci (Ω) olarak tanımlanır. Sıcaklık, ışık şiddeti, basınç gibi fiziksel parametrelere bağlı olarak malzemenin direnç değerlerinde değişimler gözlenebilir. Bu değişimler fiziksel niceliklerin değişim aralıklarına göre küçük pA ile mA arasında olabilir. Hem düşük hem de birkaç mertebede değişim gösteren akımları

ölçmek gerektiğinde ticari olarak pahalı olan elektrometrelere alternatif olarak logaritmik yükselteç, mikrokontrolcü ve yardımcı elektronik bileşenlerden oluşan sistemler tasarlanıp kullanılabilir. En basit haliyle işlemsel yükselteç tabanlı bir logaritmik yükselteç, tersleyen giriş ile çıkış terminali arasına bağlanan bir diyottan oluşur. Çıkışta, tersleyen giriş terminaline bağlı direnç uygulanan voltajın logaritmasıyla orantılı bir voltaj üretilir. Diyot ile direnç yer değiştirirse giriş sinyalinin anti-logaritması çıkışta gözlenir. Ayrıca, iki işlemsel yükselteç ve aynı kılıf içinde üretilen iki transistör yardımı ile bir sinyalin referans sinyal ile logaritmik olarak karşılaştırılması yapılabilir. Bu karşılaştırma modülü genelde malzemelerin optik soğurma ölçümlerinde kullanılır. Ayrıca tek entegre (kırmık) içinde ticari olarak üretilen logaritmik yükselteç entegreleri de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak LOG-112 entegresi verilebilir. Khairurrijal ve ark. (2007) yaklaşık 5 mertebede %0,2 hata ile çalışan LOG-112 entegresi ile bir elektrometre tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bizim gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada ise logaritmik yükselteç olarak 7,5 mertebe %0,1 hata ile akım değişimlerini ölçebilen (100 pA -10 mA) LOG-114 entegresi kullanılmıştır (Şekil 2a). Ayrıca LOG-114 için akım üst sınırı 10 mA olarak artırılmış ve içine iki adet bağımsız işlemsel yükselteç eklenerek farklı kullanımlar için uygun hale getirilmiştir. Ölçülecek akım değeri (I_1) 100pA- 10 mA aralığında ve referans akımı (I_2) 1 μA olduğunda LOG-114'ün iki adet transfer fonksiyonu $V_{o,f} = -0.249 \cdot \log(I_1/I_2) + 1.5V$ ve $V_{Logout} = 0.375 \cdot \log(I_1/I_2)$ ile hesaplanabilir. Bu değerler akıma bağlı olarak negatif ve/veya pozitif (- 4,4 V ile 4.4 V arası) olabilir. Analog-sayısal dönüştürücüler genellikle pozitif giriş gerilimleri için kullanılırlar. Bu nedenle, negatif gerilim

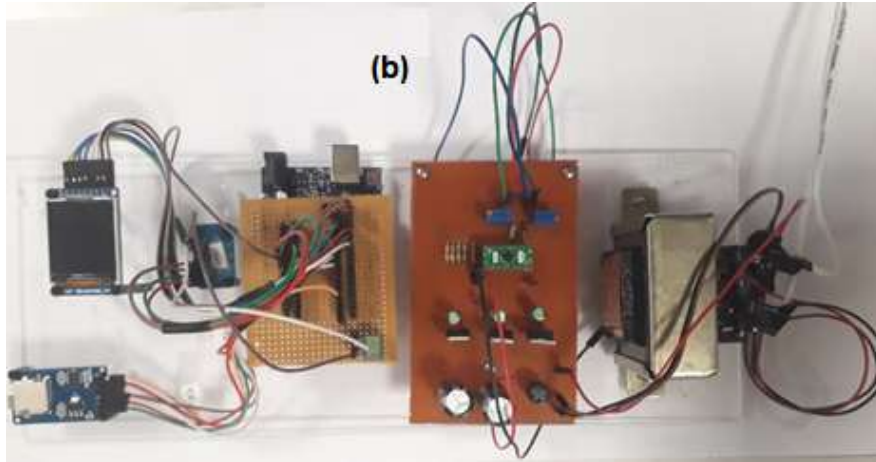
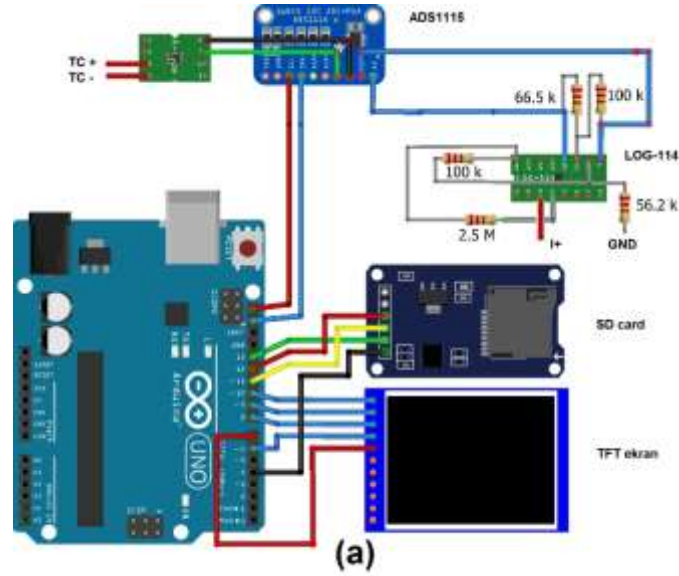
Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları

değerlerine sahip çıkış gerilimlerinin ölçülebilmesi için için kullanılacak ADC'nin ölçüm aralığına göre bir ölçek değişikliği gerekebilir. Buradaki değişiklik genellikle bir işlemsel yükselteç ile toplama devresini sisteme eklemek şeklinde veya V_{com} ile gösterilen LOG-114'ün ilgili terminaline ofset gerilimi uygulama şeklinde olabilir. Bu durumda çıkış gerilim değeri Denklem 1 ile hesaplanır:

$$V_0 = 0.375 \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + V_{com} \quad (1)$$

Bu çalışmamızda mikrokontrolcü olarak Arduino ailesinin en çok kullanılan elemanlarından biri olan UNO modeli kullanılmıştır. Bu çalışmada, UNO'da bulunan

10-bit dahili ADC'yi kullanmak yerine skala sorununa çözüm olarak elektrometre tasarımına eklenen 4-kanalı ADS1115 adı verilen 16 bit- çözünürlüklü ADC kullanılmıştır. ADC hem pozitif hem de negatif gerilimlerin tek-kutuplu (*single-ended*) veya farksal (*differential*) olarak ölçülmesine izin vermektedir. Ayrıca programlanabilen kazanç değerleri sayesinde fiziki elemanlara ihtiyaç duymadan skala ayarlaması yapılabilir. Böylece çıkış geriliminin hassasiyeti de artırılmış olacaktır. Bunun yanı sıra elektrometre tasarımına eklenen bir SD (*Secure Digital Memory*) kart yardımı ile ölçülen çıkış gerilim değerleri de kayıt altına alınmıştır (Şekil 2b).



Şekil 2. a. Elektrometre şeması, b. tasarımı gerçekleştirilen düşük akım okuma sistemi (Arduino-UNO, ADS1115, SD-kart okuyucu ve TFT-grafik ekran)

Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları

Özellikle fotodiyot uygulamalarında dedektör kapasitesini azaltmak için katoda ters besleme uygulayabilmek için V_{com} belirli bir değerde sabit tutulur. Bu çalışmada direnç içinden geçen akımın ölçülmesi için V_{com} değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada ölçüm sonrasında LOG-114 entegresinden elde edilen kaydedilmiş çıkış gerilimi (V_0) ve referans akımı (I_1) ile ölçülmek istenen akım değeri (I_2), Denklem 2 yardımı ile hesaplanabilir.

$$V_0 = 0.375 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right). \quad (2)$$

İçinde sıcaklık kompanzasyonu bulunan Omega firmasına ait sıcaklık ölçüm biriminin gerilim çıkışı, ADS1115'in farksal olarak mikrovolt ölçebilecek biçimde ayarlanan iki pinine bağlanmıştır. Ölçülen gerilimin sıcaklık değerini belirlemek için K-tipi ısı çift için $40 \mu V/K$ değerindeki Seebeck katsayısı ve sıcaklık-gerilim dönüşüm parametrelerini içeren C++ kodları Arduino-UNO içine yüklenmiştir. Böylece tasarımı gerçekleştirilen elektrometre ile hem ısıl-çiftin ürettiği gerilim değerlerine karşı gelen sıcaklık değerleri hesaplanmakta ve hem de örnek içinden geçen düşük akım değerleri ölçülebilmektedir (Şekil 2). Verilerin gerçek zamanlı değişimlerini görselleştirmek için $1.44''$ 128×128 piksel boyutlarında bir TFT-grafik ekran kullanılmıştır. Grafik ekranda $1000/T$ (K) eksenine karşı karanlık akım değerlerinin değişimini gözlemleyebilmek için gerekli kodlar Arduino-UNO'ya uygun kütüphane fonksiyonları ile eklenmiştir. Elektrometreye ait devre şeması (Şekil 2a) ile Arduino-UNO, ADS115, SD-kart okuyucu ve TFT-grafik ekrandan oluşan düşük akım okuma sistemi Şekil 2b'de gösterilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

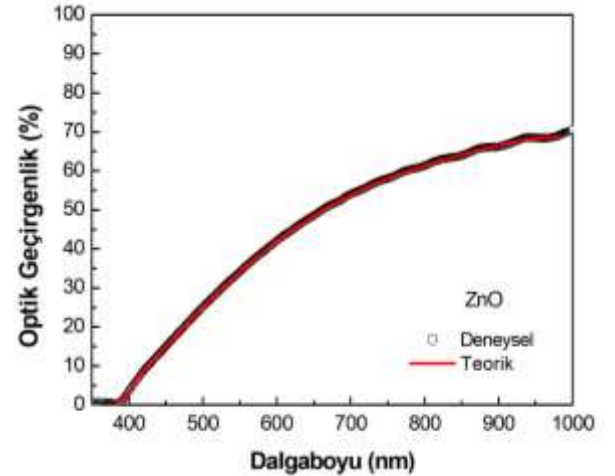
Bulgular

Spektrofotometre ile elde edilen deneysel optik geçirgenlik spektrumu ile teorik optik geçirgenlik spektrumu Şekil 3'de gösterilmiştir. Birgin ve ark.'nın (1999) geliştirdiği nokta tabanlı kısıtlamasız minimizasyon algoritması (Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm, PUMA) metodu ile deneysel ölçülen optik geçirgenlik spektrumu kullanılarak ZnO ince filmin optik sabitleri belirlenmiştir. Film kalınlığı 441 nm olarak hesaplanmıştır. Bu sabitler kullanılarak dikkate alınan dalgaboyu aralığı için hesaplanan teorik optik geçirgenlik spektrumu, deneysel spektrum ile oldukça iyi uyum göstermiştir. ZnO ince filmin yapısal analizleri için kullanılan XIK spektrumu ise Şekil 4'de gösterilmiştir. XIK sonuçları ince filmin hekzagonal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Spektrumdaki bütün pikler ZnO yapısına ait olup JCPDS file No. 36-1451 isimli

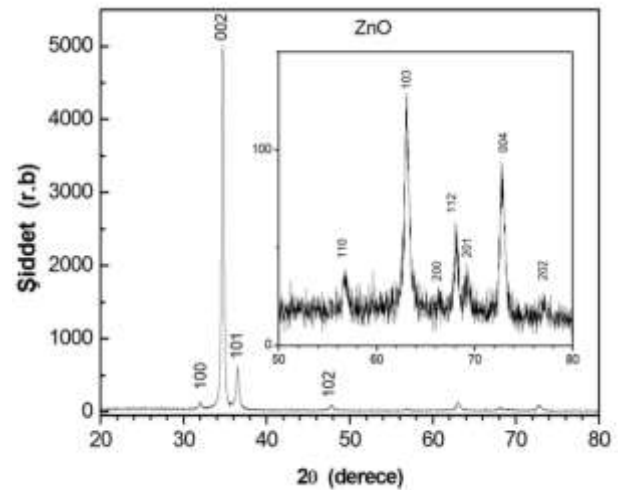
referans değerleri ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir. ZnO ince filmin kristal boyutu ölçümü Debye-Scherrer eşitliği Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0,94\lambda}{\beta \cos \theta}. \quad (3)$$

Buradaki D , kristal boyutu; λ , $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($1,54056 \text{ \AA}$); β , maksimum pikin yarı-uzunluk genişliği (FWHM) ve θ ise XIK-desenindeki maksimum pikin 2θ değerinden elde edilen Bragg açısı değeridir. Hesaplama ZnO için β -değeri (002) düzlemine karşılık gelen en kuvvetli kırınım piki dikkate alınmıştır. Buna göre ZnO için tanecik boyutu yaklaşık olarak 35 nm olarak hesaplanmıştır. (101) düzlemi dikkate alındığında ise bu değer yaklaşık olarak 33 nm olarak hesaplanmıştır.

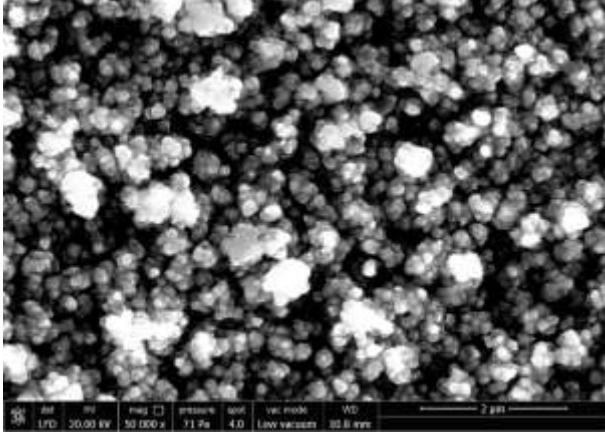
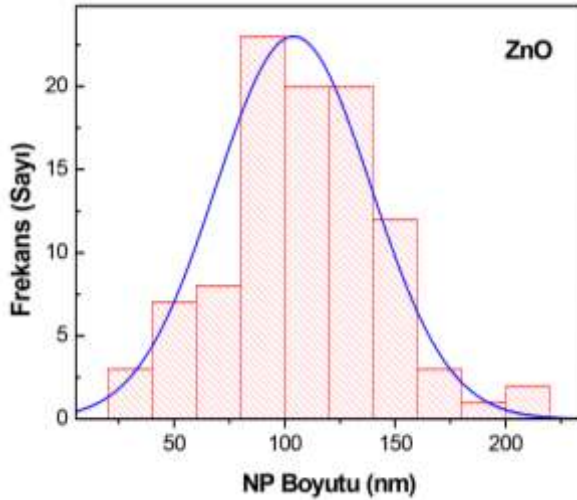


Şekil 3. UKP sisteminde ZnO ince filmin deneysel ve teorik optik geçirgenlik spektrumu



Şekil 4. UKP sisteminde ZnO ince filmin XIK deseni

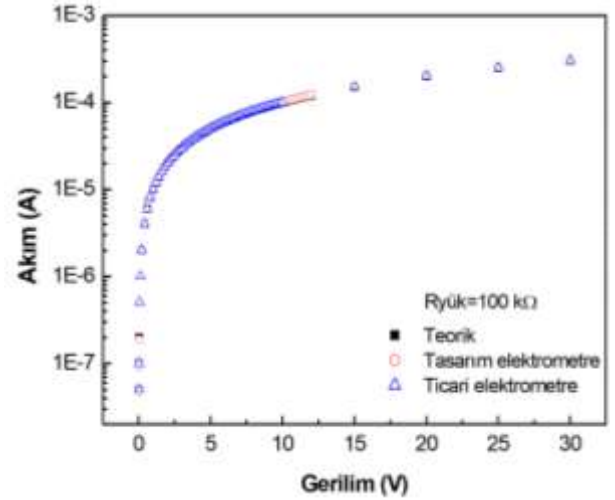
UKP sisteminde hazırlanan ince filme ait SEM görüntüsü Şekil 5'de verilmiştir. Elde edilen nanoparçacıkların minimum 30 nm ve maksimum 210 nm boyutlarında olduğu ve ortalama 104 nm çapa sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6).

**Şekil 5.** ZnO ince filme ait SEM görüntüsü**Şekil 6.** ZnO ince filme ait nanoparçacık (NP) boyut dağılımı

Enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile yapılan analizlerde alttaşın yapısında nispeten eser miktarda bulunan elementler (Ca, Si, vb.) dikkate alınmadığında, ZnO film içinde yaklaşık %50 Zn ve %50 Oksijen olduğu belirlenmiştir.

Yüksek hassasiyete (± 1 mV) sahip bir gerilim kaynağı (GW-INSTEK GPD3303S) ile 100 k Ω yük direncine uygun değerlerde gerilim farkı uygulanmıştır. Sonrasında direnç içinden geçen akım, tasarımı gerçekleştirilen

elektrometre sisteminin gerilim çıkışı, referans akım değeri ve Denklem 2 yardımı ile hesaplanmıştır. Bir karşılaştırma yapmak için ticari bir elektrometre (Keithley 6487 Electrometer) ile ölçülen yük direncinden geçen akım değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Ticari elektrometre ile tasarımı gerçekleştirilen elektrometre tarafından ölçülen akım değerleri arasındaki bağıl hata yaklaşık altı merteye için %2 civarındadır.

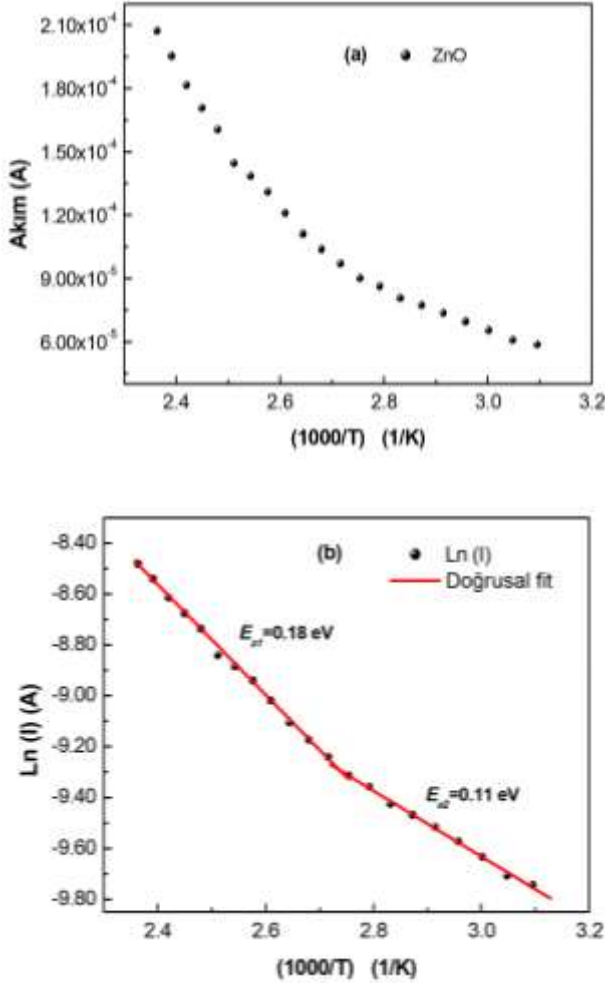
**Şekil 7.** Tasarımı gerçekleştirilen düşük akım okuma sistemi için test ölçüm sonuçları ($R_{yük}=100$ k Ω)

Elde edilen ZnO ince filmin yüzeyine buharlaştırma sistemi ve uygun bir maske yardımı ile Al metali buharlaştırılmıştır. Gap-cell (Şekil 1b) adı verilen yapıda film kalınlığı, elektrot genişliği ve elektrot uzunluğu geometrik faktör (GF) olarak dikkate alınmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen elektrometre yardımı ile ölçülen akım değeri (I) ve örnek üzerine uygulanan potansiyel farkı V olmak üzere ince filmin iletkenliği ($\sigma=GF*(I/V)$) hesaplanabilir.

ZnO ince filmin gap-cell geometrisinde film kalınlığı (441 nm), elektrot genişliği (0,4mm) ve elektrot uzunluğu (4 mm) dikkate alındığında GF değeri $2,267 \times 10^3$ (cm^{-1}) olarak hesaplanmıştır. Bundan sonra, aktivasyon enerjisini belirlemek için bir sıcaklık kontrolcüsü yardımı ile ZnO ince filmin sıcaklığı 300-450 K arasında 5 K adımlarla kontrollü olarak değiştirilmiştir. Daha sonra tasarlanan elektrometre ile farklı sıcaklık değerleri için örnek malzemenin karanlık akımı ölçülerek kayıt edilmiştir (Şekil 8a). Arrhenius-çizimi adı verilen $\ln(I)-1000/T$ değişiminden ZnO ince filmin aktivasyon enerjileri (E_a) hesaplanmıştır (Şekil 8b). Karanlık akım ölçümlerinden ZnO ince filmin E_{a1} (0,18 eV) ve E_{a2} (0,11 eV) olmak üzere iki adet aktivasyon enerjisi olduğu bulunmuştur. Örnek filmin birden fazla aktivasyon enerjisinin olmasının nedeni, oda sıcaklığına göre daha yüksek sıcaklık bölgesindeki ısı enerjisinin büyük

Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları

olması ve iletkenlik bandına göre daha derinlerde bulunan tuzaklardaki taşıyıcıların uyarılması gösterilebilir. Tasarlanan sistem sayesinde oda sıcaklığında ($T=300$ K) ölçülen karanlık akım ve GF dikkate alınarak ZnO filmin öz direnci $3,96 \Omega\text{cm}$ (iletkenliği $0,25$ S/cm) olarak hesaplanmıştır. Bu değer literatür ile uyum içindedir (Zahedi, 2014).



Şekil 8. a. ZnO ince filmin sıcaklığa bağlı karanlık akım ($\ln I-1000/T$) değişimi, **b.** Arrhenius çizimi

SONUÇ

Bu çalışmada, pA, nA ve μA mertebesinde düşük akım değerlerini ölçmek için Arduino-UNO tabanlı bir elektrometre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistem ticari cihazlar ile birlikte karşılaştırmalı olarak test edilmiş ve ölçülen akım değerleri ile set edilen akım değerlerinin yaklaşık altı mertebeye için oldukça iyi uyum içinde ol-

duğu gözlenmiştir. Ayrıca tasarlanan sistem UKP tekniği ile elde edilen bir metal oksit ince filmin (ZnO) sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu için kullanılmıştır. ZnO ince filmin oda sıcaklığındaki öz direnci $3,96 \Omega\text{cm}$ olarak hesaplanmış, karanlık akım ölçümlerinden de E_{a1} (0,18 eV) ve E_{a2} (0,11 eV) olmak üzere iki adet aktivasyon enerjisi olduğu bulunmuştur. Tasarımı gerçekleştirilen elektrometre, maliyeti düşük olduğu, güvenilir ölçümler verdiği ve geliştirilmeye açık olduğu için düşük akım ölçülmesi gereken farklı çalışmalarda da kullanmaya uygundur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 0799-YL-21, 0804-YL-21 ve 0324-NAP-16 numaralı projeler ile Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abu EL-Fadl, A., Galal, A.M., Abd El-Moiz, A.B., Rashad, M. (2005). Optical constants of Zn_{1-x}LixO films prepared by chemical bath deposition technique. *Physica B Condensed Matter*, 366(1-4): 44-54.
- Acharya, Y.B., Vyavahare, P.D. (2000). A low current logarithmic LED electrometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49: 5-9.
- Acharya, Y.B. (2006). Logarithmic current electrometer using commercially available current conveyor AD844. *International Journal of Electronics*, 4(93): 223-229.
- Atay, F. (2001). Cd_{1-x}NixS filmlerinin elektriksel, optiksel, yapısal ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Bilgin, V. (2003). ZnO filmlerinin bazı elektrik, optik, yapısal ve yüzeysel özellikleri üzerine kalay katkısının etkisi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Birgin, E.G., Chambouleyron, I., Martinez, J.M. (1999). Estimation of optical constants of thin films using unconstrained optimization. *Journal of Computational Physics*, 151: 862-888.
- Bougrine, A., El Hichou, A., Addou, M., Ebothé, J., Kachouane, A., Troyon, M. (2003). Structural, optical and cathodoluminescence characteristics of undoped and tin-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis. *Materials Chemistry and Physics*, 80(2): 438-445.
- Chopra, K.L., Major, S., Pandya, K. (1983). Transparent conductors: A status review. *Thin Solid Films*, 102(1), 1-46.
- Chui, C.O., Ito, F., Saraswat, K.C. (2006). Nanoscale germanium MOS dielectrics: Part I. Germanium oxynitrides. *IEEE Transactions. Electron. Devices*, 53(7); 1501-1508.
- Du, Y., Zhang, M.S., Hong, J., Shen, Y., Chen, Q., Yin, Z. (2003). Structural and optical properties of nanophase zinc oxide. *Applied Physics A*, 76: 171-176.

Arduino-Tabanlı Elektrometre Tasarımı ve Metal Oksit Yarıiletken Uygulamaları

- Evangelou, E.K., Mavrou, G., Dimoulas, A., Konofaos, N. (2007). Rare earth oxides as high-k dielectrics for Ge based MOS devices: An electrical study of Pt/Gd₂O₃/Ge capacitors. *Solid-State Electronics*, 51(1): 164-169.
- Fay, S., Kroll, U., Bucher, C., Vallat-Sauvain, E., Shah, A. (2005). Low pressure chemical vapour deposition of ZnO layers for thin-film solar cells: Temperature-induced morphological changes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(3): 385-387.
- Khairurrijal, M.A., Suhendi, A., Munir, M.M., Surachman, A. (2007). A simple microcontroller-based current electrometer made from LOG112 and C8051F006 for measuring current in metal-oxide-semiconductor devices. *Measurement Science and Technology*, 18: 3019-3024.
- Khairurrijal, W.M., Miyazaki, S., Hirose, M. (2000a). Analytic model of direct tunnel current through ultrathin gate oxides. *Journal of Applied Physics*, 87(6): 3000-3005.
- Khairurrijal, W.M., Miyazaki, S., Hirose, M. (2000b). Unified analytic model of direct and Fowler-Nordheim tunnel currents through ultrathin gate oxides. *Applied Physics Letters*, 77(23): 3580-3582.
- Rajput, S.S., Jamuar, S.S. (2002). Low voltage, low power, highperformance type II current conveyor-based linear current electrometer. *Review of Scientific Instruments*, 73(10): 3644-3651.
- Rajput, S.S. (2003). An improved multigain range linear current electrometer. *Review of Scientific Instruments*, 74(6): 3120-3126.
- URL-1 (2023) <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/log2112.pdf> (Erişim Tarihi: 22.02.2023)
- URL-2 (2023) <https://www.ti.com/product/LOG114> (Erişim Tarihi: 22.02.2023)
- Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G., Morales-Acevedo, A., Contreras-Puente, G. (2000). Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films. *Thin Solid Films*, 361: 53-55.
- Wang, C., Zhao, J.C., Wang, X.M., Mai, B.X., Sheng, G.Y., Peng, P.A., Fu, J.M. (2002). Preparation, characterization and photocatalytic activity of nano-sized ZnO/SnO₂ coupled photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 39(3): 269-279.
- Yıldırım, T., Gür, Emre., Tüzemen, S., Bilgin, V., Köse, S., Atay, F., Akyüz, I. (2005). Wide-bandgap modification of polycrystalline ZnO using Sn component on the basis of developing quantum-well hetero-structure. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 27(1): 290-295.
- Yıldırımlar, A. (2014). Zn tabanlı heteroeklemlerin kapasitans-voltaj karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Burdur.
- Zahedi, F., Dariani, R.S., Rozati, S.M. (2014). Structural, optical and electrical properties of ZnO thin films prepared by Spray Pyrolysis: Effect of precursor concentration. *Bulletin of Materials Science*, 37: 433-439.