

**Atf İçin:** Ünal F, Aktaş S, 2022. Işığa Duyarlı n-tipi Katkılı Metal oksit/p-tipi Si Heteroekleminin Elektriksel Karakterizasyonu. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1506 - 1517.

**To Cite:** Ünal F, Aktaş S, 2022. Electrical Characterization of n-type doped metal oxide/p-type Si Photosensitive Heterojunction . Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1506 - 1517.

### **Işığa Duyarlı n-tipi Katkılı Metal oksit/p-tipi Si Heteroekleminin Elektriksel Karakterizasyonu**

Fatih ÜNAL<sup>1\*</sup>, Sıtkı AKTAŞ<sup>2</sup>

**ÖZET:** n-tipi %1.5 Ge katkılı WO<sub>x</sub> tabakası Al/p-tipi Si üzerine Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) yöntemi kullanılarak büyütülmüştür ve Al/Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge) p-n eklemi elde edilmiştir. İnce film tabakasının yüzey özellikleri SEM ile incelenmiş ve tabakanın genel olarak pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca tabakayı oluşturan elementlerin dağılımı Enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (EDX) ile incelenmiş %96.4 W, %1.5 Ge ve %2.2 O oranlarında homojen bir şekilde dağılım gösterdikleri görülmüştür. Üretilen heteroeklemin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için aktif tabaka yüzeyine yine FBB yöntemiyle Ag doğrultucu kontaktları alınmıştır. Sonuç itibarıyla Al/Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge)/Ag p-n ekleminin ±4V potansiyel aralığında, karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde I-V ölçümleri yapılmış, seri direnç, diyot idealite faktörü, engel yüksekliği, ters doyma akımı gibi diyot parametreleri farklı yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Seri direnç değerlerinin 70-10Ω arasında, diyot idealite faktörünün 14.1 ile 3.9 arasında, engel yüksekliğinin 0.54-0.15eV ve ters doyma akımının 1.34x10<sup>-4</sup>A-1.1x10<sup>-3</sup>A arasında değerler aldığı görülmüştür. Işık şiddetinin artmasıyla ürettiğimiz diyotun seri direnci azalmış diyot ideale yaklaşmıştır. Ayrıca ters doyma akımının ışık şiddetiyle on kat artması ürettiğimiz heteroeklemin tipik fotodiyot davranışı sergilediğinin göstergesidir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotodiyot, metal oksit yarıiletken, I-V, heteroeklem, p-n eklemi

### **Electrical Characterization of n-type doped metal oxide/p-type Si Photosensitive Heterojunction**

**ABSTRACT:** The n-type 1.5% Ge doped WO<sub>x</sub> thin film was deposited on Al/p-type Si wafer using the Physical Vapour Deposition (PVD) technique and Al/Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge) p-n junction was fabricated. The surface properties of the thin film layer were examined by scanning electron microscopy (SEM) and it was generally observed that the layer had a smooth structure with various size particles grown on surface. In addition, the elemental composition of the thin film was examined by Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and it was observed that all detected elements showed a homogeneous distribution at the rates of 96.4% W, 1.5% Ge and 2.2% O. In order to examine the electrical properties of the fabricated heterojunction, Ag rectifier contacts were grown on the active layer surface by the PVD method. As a result, I-V measurements of Al/p-Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag heterojunction was performed under dark and various light intensities in the potential range of ±4V. Thus, diode parameters such as series resistance, diode ideality factor, barrier height and reverse saturation current were determined by using different methods. It is observed that the series resistance is between 70-10Ω, the diode ideality factor is between 14.1 and 3.9, the barrier height is between 0.54-0.15eV and the reverse saturation current is between 1.34x10<sup>-4</sup> A-1.1x10<sup>-3</sup> A. The series resistance of the fabricated diode decreased with the increase of the light intensity, and the diode approached the ideal. In addition, the ten times increase in reverse saturation current with light intensity indicates that the fabricated heterojunction exhibits typical photodiode behaviour.

**Keywords:** Photodiode, metal oxide semiconductor, I-V, heterojunction, p-n junction

<sup>1</sup> Fatih ÜNAL ([Orcid ID: 0000-0002-6155-7051](https://orcid.org/0000-0002-6155-7051)), Giresun Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (GRÜMLAB), Giresun, Türkiye

<sup>2</sup> Sıtkı AKTAŞ ([Orcid ID: 0000-0002-9143-6752](https://orcid.org/0000-0002-9143-6752)), Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fatih ÜNAL, e-mail: fatih.unal@giresun.edu.tr

## GİRİŞ

Metal oksitler yarıiletken teknolojisinde yeni nesil devre elemanları geliştirme çalışmalarında büyük ilgi görmektedirler (Karabat ve Arsel, 2015; Al-Hazmi ve Yakuphanoglu, 2018; Pradepp ve ark., 2018; Chakhalian ve ark., 2020). Bunların arasında tungsten oksit, optoelektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan n-tipi metal oksit yarı iletkenlerinden biridir (Hai ve ark., 2019). Tungsten oksit ve türevleri kontrol edilebilen geniş bir yasak enerji bant aralığına (2.5 – 3.7 eV) sahiptir ve bu özelliğinden dolayı optoelektronik çalışmalarda yoğun ilgi görmektedir (Kulkarni ve ark., 2015; Cong ve ark., 2016; Hai ve ark., 2019). Üretim koşullarına bağlı olarak tungsten oksit yapısal ve kusursal çeşitliliğinden dolayı fotodedektörler, elektrokromik cihazlar ve fotovoltaiik piller gibi alanlarda yaygın uygulamaları vardır. Metal oksit yapıların optik ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesi için bazı metallerle katkılama yapılabilir (Kalanur ve Seo, 2019; Kurt ve ark., 2021; Aslan ve ark., 2022). Germanyum (Ge) düşük yasak enerji bant aralığına (0.67 eV), çok yüksek absorpsiyon katsayısına ve kırılma indeksine sahip optoelektronik uygulamalarda çokça tercih edilen doğal bir yarıiletken bir malzemedir (Philipp ve Taft, 1959; Cavalcoli ve ark., 2015). Bunun yanında, birçok metal oksitin elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesinde germanyum katkılama örnekleri literatürde mevcuttur (Lee ve ark., 2015; Lu ve ark., 2016; Krammer ve akr., 2017; Krammer ve ark., 2017; Ji ve ark., 2019).

Tungsten oksit ince filmlerinin yapısal çeşitliliğini sağlayan en önemli faktörlerden biride kullanılan üretim yöntemidir. Genel olarak kullanılan ince film büyütme yöntemleri epitaksiyel büyütme (Li ve ark., 2006), elektrokimyasal biriktirme (Yavuz ve ark., 2019; Firat, 2019), modifiye edilmiş kimyasal banyo yöntemi (Ünal ve ark., 2021), hidrotermal (Kalanur ve Seo, 2019), spin kaplama (Smirnov ve ark., 2010; Serkan ve ark., 2021), termal buharlaştırma (Lee ve ark., 2015; Zurnacı ve ark., 2021) ve magnetron püskürtme (Jazmati ve Abdallah, 2018; Makino ve Shimizu, 2018; Aslan ve ark., 2022) gibi sıralanabilir. Bunların içerisinde magnetron püskürtme yöntemi birlikte biriktirmeye olanak sağlayarak birden fazla malzemenin alttaş üzerine aynı anda büyütmeye olanak sağlar (Kurt ve ark., 2021). Ayrıca, büyütülen ince film yüzeyinin pürüzsüz olması, kaplama kalınlığının kontrol edilebilmesi ve vakum altında gerçekleştiği için daha temiz kaplama yapılabilmesi bu yöntemin avantajlarından biridir.

Dolayısıyla bu çalışmada Ge katkılanmış WO<sub>x</sub> ince film tabakası birlikte biriktirme tekniği kullanılarak Al/p-tipi Si üzerine magnetron püskürtme tekniği ile büyütülmüştür. Daha sonra elde edilen Al/p-tipi Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge) heteroekleminin yüzey morfolojisi ve elementel dağılımı tespit edilmiştir. Üretilen heteroeklemin elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için aktif tabaka yüzeyine magnetron püskürtme yöntemi ile Ag doğrultucu kontakları alınmıştır. Sonuç itibarıyla Al/p-Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge)/Ag p-n ekleminin ±4V potansiyel aralığında, karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde elektriksel karakterizasyonu yapılmış, seri direnç, diyot idealite faktörü, engel yüksekliği, ters doyma akımı gibi diyot parametreleri farklı yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

## MATERYAL ve METOT

Fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan manyetik püskürtme yöntemi kullanılarak Ge ve W Al/p-tipi Si alt tabaka üzerinde Nanovak manyetik sıçratma sistemi (Model: NVTs-400) ile aynı anda biriktirilmiştir. Manyetik püskürtme metodu vakum altında gerçekleştiği için temiz ve düzenli bir ince film biriktirmeye olanak sağlamaktadır. Si alt tabaka kaplamanın yapılacağı sisteme yerleştirilmeden önce sırasıyla aseton, metanol ve saf su ile ultrasonik banyoda temizlenmiş ve nitrojen gazı ile kurutularak temizlik işlemi tamamlanmıştır. Daha sonra alt tabaka sisteme yerleştirilmiş ve sistem basıncı ~1x10<sup>-6</sup> mbar seviyelerine düşene kadar beklenmiştir. Nanovak manyetik püskürtme sistemi iki adet RF ve bir adet DC sıçratma başlığına sahip olduğu için birden fazla malzemenin aynı anda biriktirilmesine olanak sağlamaktadır. %99.99 saflığa ve 2 inç çapa

sahip W ve Ge hedefler kullanılarak Ge atomları W içerisine katkılanmıştır. Katkılanma oranı kristal kalınlık monitörü kullanılarak her iki hedefin biriktirme oranları hedeflere uygulanan güç ve sisteme enjekte edilen argon gazı miktarı ile ayarlanmıştır. Sisteme 5 mTorr Ar gazı enjekte edilerek W ve Ge hedef malzemeleri sırasıyla DC (350V, 320 mA) ve RF (20W) güç kaynaklarına bağlanarak 1.9 Å s<sup>-1</sup> ve 0.3 Å s<sup>-1</sup> biriktirme oranlarıyla Al/p-tipi Si alt taban yüzeyine biriktirilmişlerdir. Bu esnada sistemin basıncı 2.84x10<sup>-3</sup> Torr seviyesine kadar yükselmiştir. Son olarak, gerekli maskeleme işlemleri yapılarak yaklaşık olarak 1 mm çapında 150 nm kalınlığında doğrultucu Ag kontaklar 1.8 Å s<sup>-1</sup> biriktirme oranıyla RF (45 W) güç kaynağı kullanılarak atılmıştır. Sonuç olarak Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.9%Ge)/Ag heteroeklemi üretilmiştir.

Üretilen heteroeklemin yüzey morfolojisi ve elementel analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Hitachi SU 1510) ve SEM'e bağlı Enerji dağılımlı X-ray spektroskopisi (SEM-EDX) kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin kesit alanından alınan SEM görüntüleriyle kaplama kalınlığı ve ayrıca EDX sonuçlarında biriktirilen malzemelerin moleküler ağırlık oranları belirlenerek katkılama oranı belirlenmiştir.

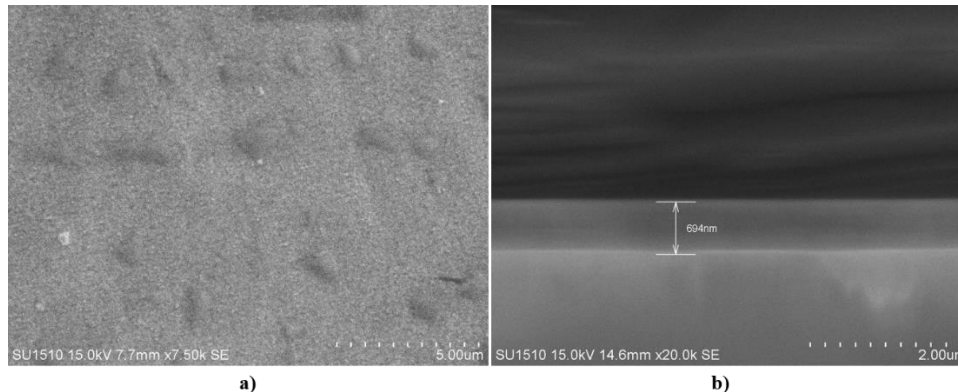
Üretilen heteroeklemin elektriksel karakterizasyonu Solar Simulator LSS 900 Characterisation System kullanılarak karanlık ve 20, 40, 60, 80, 100 mW.cm<sup>-2</sup> ışık şiddetleri altında yapılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

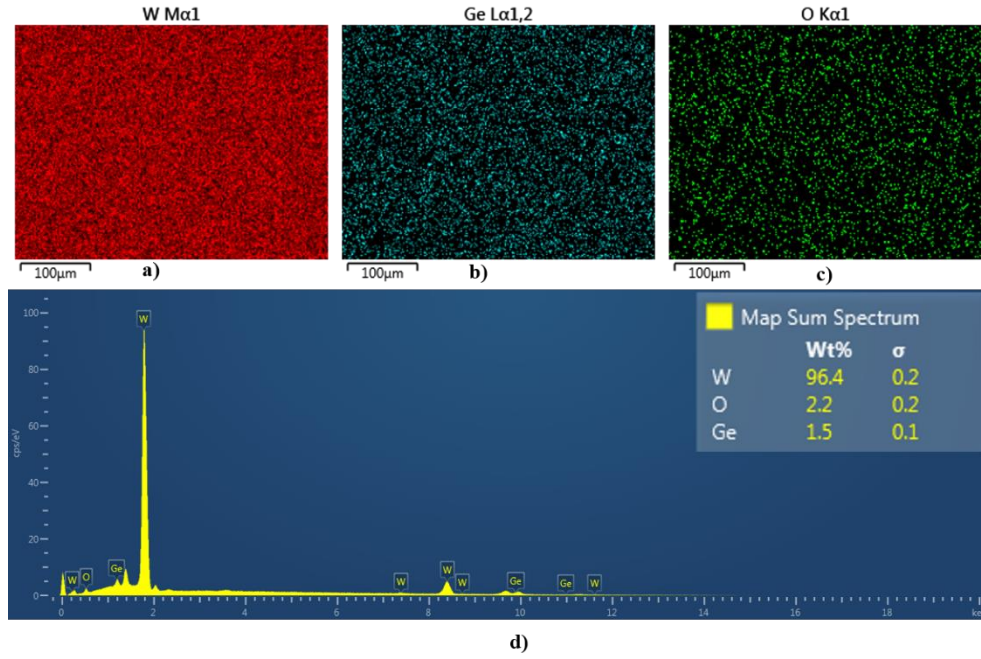
### Yüzey Morfolojisi ve Elementel Analiz

Fiziksel buhar yöntemi ile Al/p-tipi Si üzerine büyütülen Ge katkılanmış WO<sub>x</sub> ince filminin yüzeyden ve kesit alanından alınan SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 1a ve 1b'de verilmiştir. Filmin yüzeyinde yoğun olmamakla birlikte farklı boyutlarda parçacıklar olduğu görülmektedir. Yüzeyin genelinde filmin homojen olarak büyüdüğü, yüzeyde çatlaklara ve gözeneklere rastlanmadığı belirlenmiştir. Bunun yanında, Al/p-tipi Si üzerine büyütülen ince film kalınlığı şekil 1b'de gösterilen kesit alan görüntüsünden 694 nm olarak ölçülmüştür.

İnce film kaplamasının kimyasal bileşimlerine dair analizi SEM-EDX kullanılarak yapılmıştır. Şekil 2d'de görüldüğü gibi, kaplamanın W, Ge ve O elementlerinden oluştuğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, şekil 2a, 2b ve 2c de sunulan görüntülerde açıkça görülmektedir ki, W, Ge ve O kaplama içerisinde homojen bir şekilde dağılmışlardır. Bunun yanında, şekil 2d içinde verildiği üzere, W, Ge ve O'nun EDX spektrumu ile belirlenen ağırlıkça elementel oranları %96.4, %1.5 ve %2.2 dir. Bu sonuçlardan yola çıkarak %1.5 oranında Ge'un W içerisine aynı anda biriktirme yöntemi kullanılarak ince filmin büyütüldüğü sonucuna varılabilir. Ayrıca, EDX-spektrumunda belirlenen oksijen, malzemenin kaplama işlemi bittikten sonra doğal olarak oksitlenmesinin sonucudur. Sonuç olarak Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag tabakalarına sahip bir heteroeklem elde edilmiştir.



Şekil 1. a) Ge katkılanmış WO<sub>x</sub> yüzeyinin 7500 büyütmede alınmış SEM görüntüsü b) Üretilen heteroeklemin kesit alanından alınmış SEM görüntüsü.



Şekil 2. a) W, b) Ge ve c) O'nin kaplamadaki dağılımlarının SEM-EDX görüntüleri. d) İnce film kaplamanın EDX spektrumu.

### Elektriksel Analiz

Metal-yarıiletken (MS), metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-polimer-yarıiletken (MPS), metal-yalıtkan-yarıiletkenler (MIS), p-n eklemleri gibi heteroeklemlerin elektriksel karakterizasyonu oldukça önemlidir. Elektriksel karakterizasyon farklı sıcaklık, ortam, frekans aralıklarında belirlendiği gibi farklı ışık şiddetleri altında da yapılmaktadır. Farklı ışık şiddeti altında yapılan elektriksel karakterizasyonlar optoelektronik alanlarda kullanılan cihazlar için ayrıca önemli bir yere sahiptir.

Seri direnç ( $R_s$ ), diyot idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ), ters doyma akımı ( $I_0$ ) gibi bazı elektriksel parametreler farklı metotlar kullanılarak belirlenebilir. Bu metotlardan bazıları, geleneksel metot, Cheung&Cheung metodudur.

Geleneksel metotta akım gerilim arasındaki ilişki termoiyonik emisyon teorisine göre belirlenir ve denklem 1 (Al-Ta'ii ve ark., 2016; Aldemir ve ark., 2017) 'de bu denklem verilmiştir.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{kT}\right) - 1\right] \quad (1)$$

Burada A aktif diyot alanı,  $A^*$  Richardson sabiti (p-tipi Si için teorik Richardson sabiti  $32 \text{ A cm}^{-1} \text{ K}^2$ ),  $q$  elektronun yükü,  $\Phi_b$  engel yüksekliği,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklık,  $V$  uygulanan potansiyel,  $R_s$  seri dirençtir.  $V-IR_s \gg 3kT$  olduğunda eşitlik 1

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2)$$

Halini alır ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3)$$

Eşitlik ikinin her iki tarafının logaritması alınıp  $V$  ye göre türevi alınır

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln(I))} \quad (4)$$

$\ln(I)$ 'nın  $V$ 'ye karşı çizilen grafiğinin lineer bölgesinin eğimi diğer sabitlerle birlikte hesaplanırsa  $n$  idealite faktörü bulunmuş olur.  $\ln(I)$ 'nın  $V$ 'ye karşı çizilen grafiğinin lineer bölgesinin  $\ln(I)$ 'yı kestiği nokta bize ters doyma akımı  $I_0$ 'ı verir. Ayrıca denklem 3'te sabitler ve bulunan değerler yerine konulursa engel yüksekliği  $\Phi_b$  bulunmuş olur.

Cheung&Cheung metodunda ise Cheung&Cheung fonksiyonları (Cheung ve Cheung, 1986) kullanılarak diyot idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri belirlenir. Eşitlik 5-6-7 de Cheung&Cheung fonksiyonları verilmiştir.

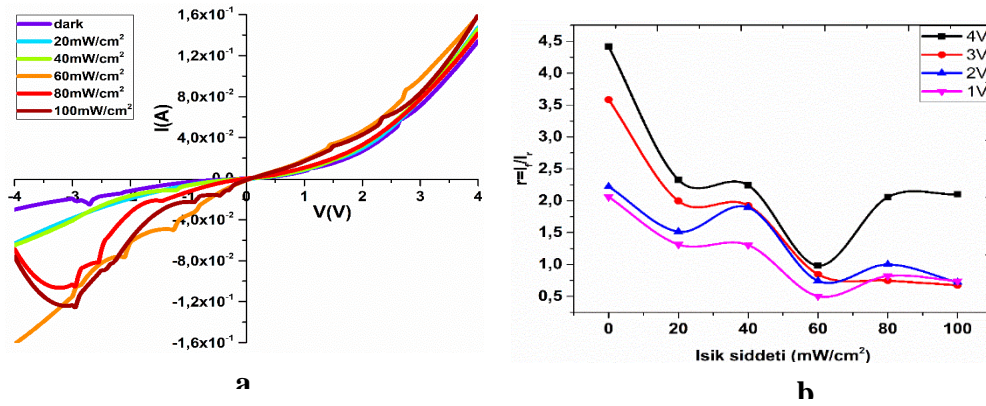
$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (5)$$

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (6)$$

$$H(I) = IR_s + n\phi_b \quad (7)$$

Yukardaki eşitliklerde I-V grafiğinin düşük ve orta voltaj bölgesindeki değerler kullanılarak  $\frac{dV}{d\ln(I)}$  ve  $H(I)$ 'nin I'ya karşı grafiği çizilir.  $\frac{dV}{d\ln(I)}$ 'nin I'ya karşı çizilen grafiğinin eğimi  $R_s$  değerini, eğrinin y eksenini kestiği değerden de diğer sabitler kullanılarak n idealite faktörü hesaplanır.  $H(I)$ 'nin I'ya karşı çizilen grafiğinde eğrinin y eksenini kestiği noktadan n değeri kullanılarak  $\phi_b$  belirlenir. Bu eğrinin eğimi ise  $R_s$  değerini verir. Ayrıca  $R_j = \partial V / \partial I$  nın V ye karşı çizilen grafiğinden eklemlerin  $R_s$  seri direnç belirlenebilir (Rajagopal Reddy ve ark., 2021; Ünal, 2021).

Şekil 3a'da Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin I-V grafiği verilmiş ve heteroeklemin doğrultucu karakteristik gösterdiği ve farklı ışık şiddetleri altında elektriksel iletkenliğinin hem düz hem de ters besleme altında arttığı görülmektedir.

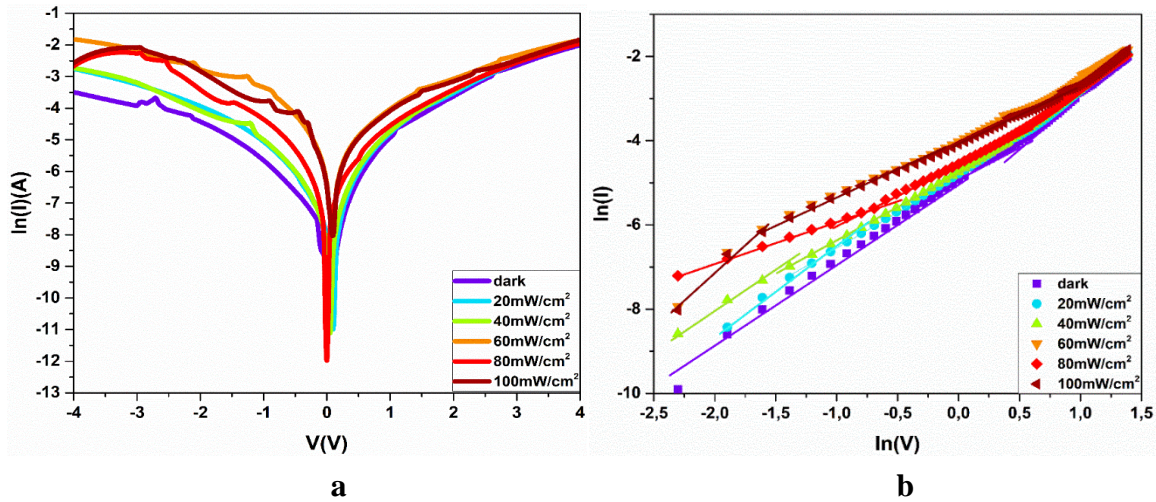


Şekil 3. Al/Si/WO<sub>x</sub>(%1.5Ge)/Ag p-n ekleminin farklı ışık şiddetleri altında a) I-V b) farklı voltaj değerlerinde doğrultma oranının değişimi.

Şekil 3b'de Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin doğrultma oranı verilmiştir. Doğrultma oranı r doğrultucu kontaklar için önemli bir parametredir ve  $r = I_f / I_r$  ile belirlenir (Reus ve ark., 2012). Burada  $I_f$  düz (forward) besleme altındaki akım,  $I_r$  ise ters (reverse) beslemedeki akımdır. Hem karanlık hem de farklı ışık şiddetleri altında düşük voltaj bölgesinden yüksek voltaj bölgesine doğru gidildikçe r oranının arttığı görülmektedir. Karanlık ortamda ve 1V potansiyel altında r oranı yaklaşık 2 iken, 4V potansiyel altında yaklaşık 4.5 olduğu görülmektedir. Artan voltajla beraber  $I_f$  akımının  $I_r$ 'ye oranla daha fazla yükselmesi r oranının artmasına sebep olmuştur.

Şekil 4a'da ters ve düz besleme altında bir asimetrinin olduğu görülmektedir. Düz beslemede, karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında lineer bölgenin yaklaşık 0.05V ile 0.35V potansiyelleri arasında olduğu ve 0.35V tan daha yüksek potansiyellere doğru gidildikçe seri dirençlerin etkisinin ortaya çıktığı görülmektedir. Ters beslemede ışık şiddetinin artmasıyla akımın arttığı daha bariz bir şekilde görülmektedir. Bu durum tipik foto diyot davranışıdır (Inamdard ve ark., 2014). Işık altında tabakalar arasında oluşan fakirleşmiş bölgede yeni elektron-boşluk çiftleri meydana gelir. Dış elektrik alan kuvveti altında tabakalarda bir gerilim oluşur ve bu gerilim tanecik sınırlarında bir iç elektrik alan kuvvetinin oluşmasını sağlar. Oluşan iç kuvvet elektronları ve holleri birbirinden ayırır. Ayrılan bu yük taşıyıcıları akıma katkıda bulunarak artmasını sağlar (Rhoderick, 1982). Ayrıca ters besleme altında doymamışlık

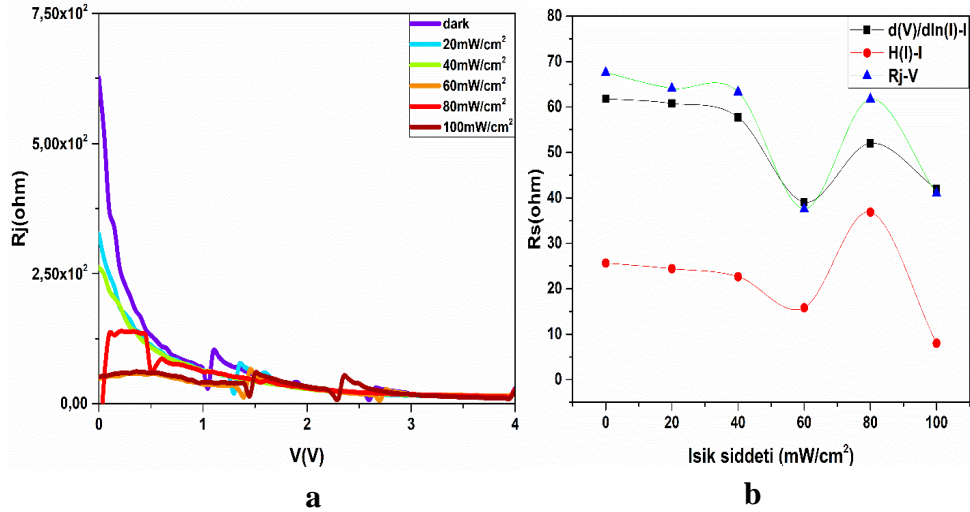
durumu görülmektedir. Bunun sebebi doğrultucu kontak ile  $WO_x$ (%1.5%Ge) tabakası arasındaki arayüz durumları ve engel yüksekliğinin görüntü yük kuvvetlerini azaltmasıdır (Kampen ve ark., 2002; Çetinkaya ve ark., 2013; Rajagopal Reddy ve ark., 2021).



Şekil 4. Al/Si/ $WO_x$ (%1.5Ge)/Ag p-n ekleminin a) yarı logaritmik I-V grafiği ve b) duble logaritmik I-V grafiği

Metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-organik-yarıiletken (MOS), p-n eklemi vb. yapıların akım iletim mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için duble logaritmik I-V grafiği çizilmektedir. Şekil 4b'de Al/Si/ $WO_x$ (1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında duble logaritmik I-V grafiği verilmiştir. Şekil 4b'de eğimleri ve yerleri birbirinden farklı olan  $\ln(I)$  ve  $\ln(V)$  dalarının var olduğu görülmektedir. Karanlık ortamdan ışıklı ortama doğru akımın arttığı ve her bir grubun kendi içerisinde iki farklı bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Buradaki akım değerleri  $I \approx V^m$  bağıntısıyla potansiyele bağlıdır (Rajagopla Reddy ve ark., 2021). Burada m eğrilerin eğimini göstermektedir (Gündüz ve ark., 2012; Altındal ve ark., 2019). Düşük voltaj bölgesindeki akım iletim mekanizması ohmik davranış ile açıklanırken (Berglund, 1966; Wagle ve Shirodkar, 2000; Altındal ve ark., 2019) orta ve yüksek voltaj bölgesinde TCLC ile açıklanır (Ocak ve ark., 2009).

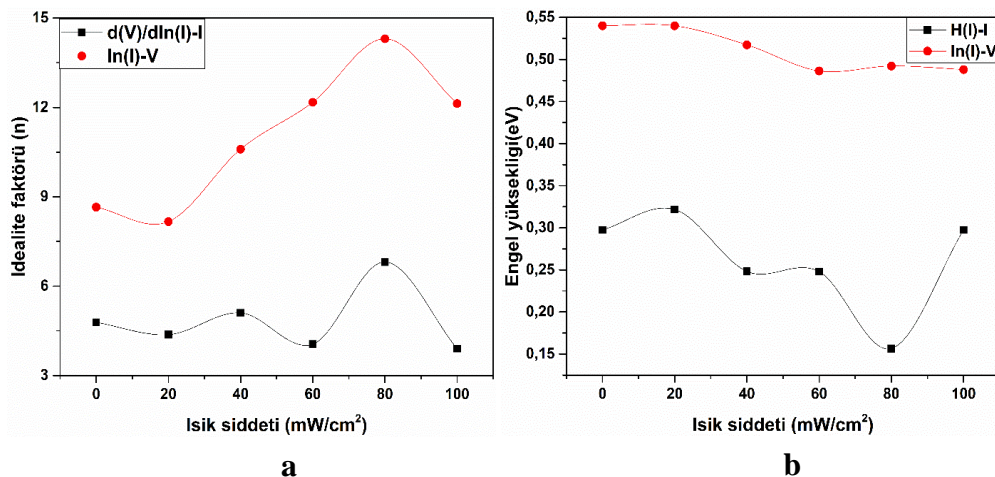
Seri direnç yarıiletken devre elemanları için önemli bir parametredir ve cihaz performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Al/Si/ $WO_x$ (1.5%Ge)/Ag p-n ekleminde seri dirençler  $WO_x$ (%1.5Ge) tabakası ile Ag kontak arasında, Si ile  $WO_x$ (%1.5Ge) tabakaları arasında ve Si ile Al arasındaki etkileşimlerle ortaya çıkar. Şekil 5a'da Al/Si/ $WO_x$ (1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin farklı ışık şiddeti altında eklem direnci  $R_j$ 'nin V'ye karşı çizilen grafiği verilmiştir. Hem ışık şiddetinin hem de voltaj değerinin artmasıyla  $R_j$  değerinin azaldığı ve yüksek voltaj bölgesinde neredeyse lineer bir hal aldığı görülmektedir. Düz besleme altındaki lineer  $R_j$  değeri bize seri direnç  $R_s$  değerini verir (Lapa ve ark., 2020).  $R_j$ -V grafiğinden belirlenen  $R_s$  değerleri karanlık ortamda  $67\Omega$  ve  $100\text{ mW cm}^{-2}$  ışık şiddeti altında  $40\Omega$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca  $d(V)/d(\ln(I))$ -I,  $H(I)$ -I ve  $\ln(I)$ -V grafiklerinden belirlenen  $R_s$  değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişim grafiği şekil 5b'de verilmiştir. Her üç yöntemle hesaplanan  $R_s$  değerleri ışık şiddetinin değişmesiyle benzer davranışlar sergilemiş ve ışık şiddetinin artmasıyla azalmıştır. Bu azalışın sebebi foto iletkenliğin artmasıdır (Çetinkaya ve ark., 2013).



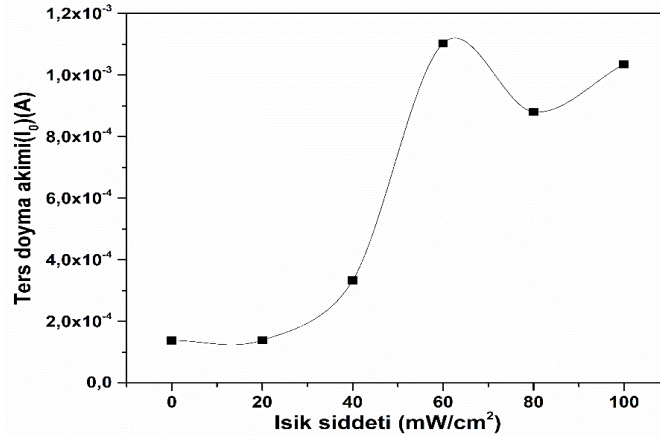
Şekil 5. Al/Si/WO<sub>x</sub>(% 1.5Ge)/Ag p-n ekleminin a) R<sub>j</sub>-V grafiği ve b) farklı metotlarla hesaplanan R<sub>s</sub> değerinin ışık şiddetine bağlı değişimi

Şekil 6'da Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin n ve  $\Phi_b$  değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 6a'da  $d(V)/d(\ln(I))-I$  grafiğinden belirlenen n değerleri 6.80 ile 3.90 arasında değerler almışken  $\ln(I)-V$  grafiğinden belirlenen n değerleri 14.13 ile 8.16 arasında değerler almıştır. Şekil 6b'de  $H(I)-I$  grafiğinden hesaplanan  $\Phi_b$  değerleri 0.29 ile 0.15 eV arasında değerler almışken  $\ln(I)-V$  grafiğinden hesaplanan  $\Phi_b$  değerleri 0.54 ile 0.48 eV arasında değerler almıştır. Bu farklılıkların genel sebebi geleneksel metotta düşük voltaj bölgesindeki veriler alınarak hesaplamalar yapılırken Cheung&Cheung metodunda düşük ve orta voltaj bölgesindeki veriler alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 6'da n ve  $\Phi_b$  değerleri genel itibariyle ışık şiddetinin değişimine karşı benzer davranış sergilemişlerdir. Her iki metotla hesaplanan n değerleri ışık şiddetinin artmasıyla artmıştır. Bu durum ışık altında moleküler yapıların tekrar düzenleniyor olmasından kaynaklanır. Ayrıca n değerlerinin ideal diyot durumundan oldukça uzaktır. Bunun sebebi istenmeyen oksit tabakalarının oluşumu, seri dirençlerin etkisi ve kirlilik durumlarıdır (Frag, 2009; Rajagopal Reddy ve ark., 2021). Ayrıca tabakalardaki düzensiz yük dağılımında n değerlerinin yüksek olmasına sebep olur (Tung, 1992).

Şekil 7'de Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin ters doyma akımının ışık şiddetine bağlı değişim grafiği verilmiştir. Işık şiddetinin artmasıyla  $I_0$  değeri genel itibariyle yükselmiş ve en yüksek değeri 60 mW cm<sup>-2</sup> ışık şiddetinde görmüştür. Karanlık ortamda  $I_0$  değeri  $1.34 \times 10^{-4}$  A iken 60 mW cm<sup>-2</sup> de bu değer  $1.1 \times 10^{-3}$  A'ye kadar yükselmiştir. Ters doyma akımı yaklaşık olarak on kat artış göstermiştir.

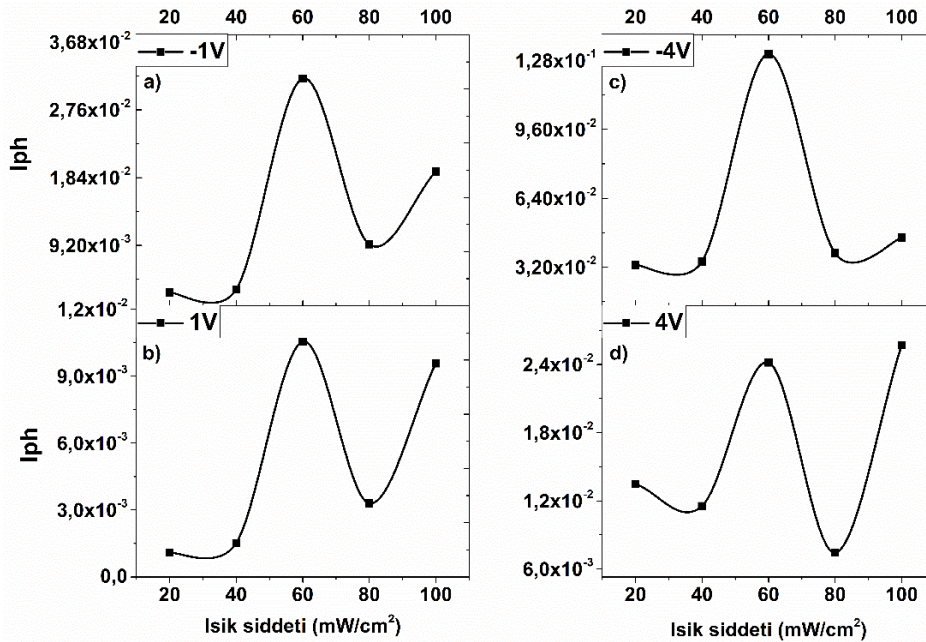


Şekil 6. Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin farklı metotlarla hesaplanan a) n ve b)  $\Phi_b$  değerlerinin ışık şiddetine bağlı değişimi



Şekil 7. Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin ters doyma akımı  $I_0$ 'ın ışık şiddetine bağlı değişimi

Şekil 8'de Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin a) -1V, b) 1V, c) -4V ve d) 4V potansiyel değerlerinde foto akımın ( $I_{ph}$ ) ışık şiddetine bağlı değişim grafiği verilmiştir. Hem düşük voltaj bölgelerinde hem de yüksek voltaj bölgelerinde ters besleme altında  $I_{ph}$  değerlerinin düz besleme altındaki  $I_{ph}$  değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum ürettiğimiz p-n ekleminin foto diyot karakteristiği gösterdiğinin belirtisidir. Neredeyse tüm voltaj değerlerinde maksimum  $I_{ph}$  değerleri 60 mW cm<sup>-2</sup> ışık şiddeti altında görülmüştür. 60 mW cm<sup>-2</sup> ışık şiddeti altında en düşük  $R_s$  değerleri bu bölgede  $I_0$  ve  $I_{ph}$  değerlerinin yüksek çıkmasına sebep olmuştur. Ayrıca 60 mW cm<sup>-2</sup> ışık şiddeti altında p-n eklemi fotonlarla üretilen elektron sayısı bakımından doyma noktasına ulaşmıştır.



Şekil 8. Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin foto akımının ( $I_{ph}$ ) ışık şiddetine bağlı değişimi

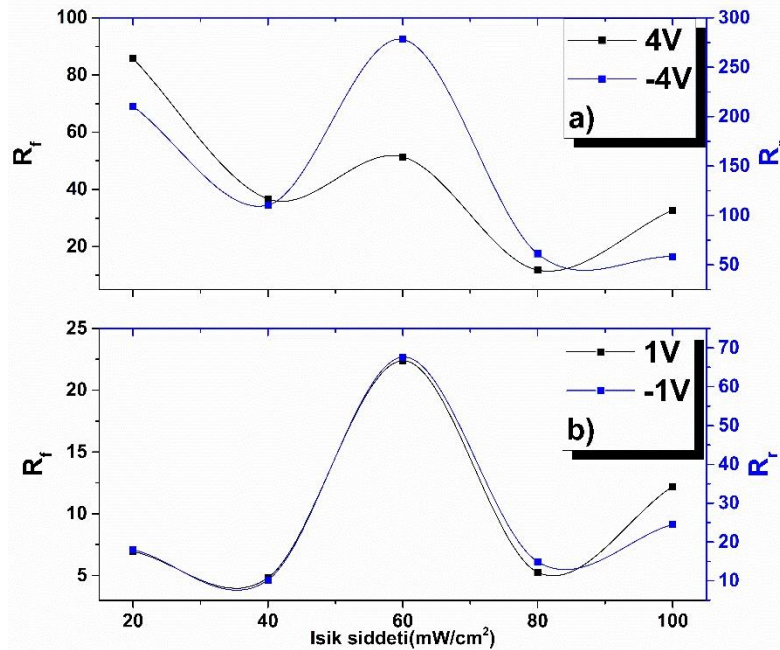
Şekil 9'da Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin a) ±1V ve b) ±4V potansiyel değerlerinde ışık duyarlılığının ( $R$ ) ışık şiddetine bağlı değişim grafiği verilmiştir. Diyotların foto duyarlılık değeri  $R$

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{inc} \cdot A} \quad (8)$$

ile hesaplanır (Gündüz ve ark., 2013). Burada  $I_{ph}$  foto akım,  $P_{inc}$  gelen ışığın şiddeti ve  $A$  kontak alanıdır (Patel ve ark., 2019). Şekil 9'da sol taraftaki y-ekseni düz besleme (forward bias) altındaki duyarlılığı gösterirken sağ taraftaki y-ekseni ters besleme (reverse bias) altındaki duyarlılığı göstermektedir. Yine aynı grafikte siyah noktalar düz besleme altındaki duyarlılık değerleri iken mavi noktalar ters beslemede ki duyarlılık değerleridir.



Şekil 9'da tüm voltaj değerlerinde  $R_f$  değerlerinin  $R_r$  değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ters besleme altında  $I_{ph}$  değerlerinin düz besleme altındaki  $I_{ph}$  değerlerinden yüksek olmasıdır. Ayrıca uygulama potansiyelinin artmasıyla  $R$  değerlerin de arttığı görülmüştür. Yüksek voltaj bölgesinde heteroeklemlerin ışığa duyarlılığı artmıştır. 1V potansiyelde  $R_f$  değerleri  $5-25 A W^{-1}$  arasında değerler almışken -1V potansiyelde  $R_r$  değerleri  $10-70 A W^{-1}$  arasında değerler almıştır. 4V potansiyelde  $R_f$  değerleri  $20-100 A W^{-1}$  arasında değerler almışken -1V potansiyelde  $R_r$  değerleri  $50-300 A W^{-1}$  arasında değerler almıştır. 4V potansiyel değeri hariç en yüksek  $R$  değerleri  $60 mW cm^{-2}$  ışık şiddeti altında görülmüştür.



Şekil 9. Al/Si/WO<sub>x</sub>(1.5%Ge)/Ag p-n ekleminin ışığa duyarlılığının ( $R$ ) ışık şiddetine bağlı değişimi

## SONUÇ

Alt tarafından Al ohmik kontak alınmış p-tipi Si üzerine %1.5 oranında Ge katkılanmış WO<sub>x</sub> tabakası FBB yöntemiyle başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Aktif tabakanın yüzey analizi SEM ile yapılmış ve düşük oranda parçacıklar içeren genel olarak pürüzsüz bir forma sahip olduğu görülmüştür. Tabakayı oluşturan elementlerin dağılım oranı EDX ile belirlenmiş ve film tabakası içerisinde bu elementlerin homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Karanlık ve farklı ışık şiddeti altında p-n ekleminin elektriksel karakterizasyonu ters ve düz beslemede incelenmiştir. p-n ekleminin doğrultucu karakteristik gösterdiği, ışık altında foto iletkenliğinin genel itibari ile arttığı görülmüştür. Ayrıca ürettiğimiz heteroeklemin karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında diyot parametreleri belirlenmiş ve ışık şiddetinin artmasıyla seri direnç, engel yüksekliği değerlerinin azaldığı, diyot idealite faktörü ve ters doyma akımının arttığı gözlemlenmiştir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları arasında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

Al-Hazmi FE, Yakuphanoglu F, 2018. Photoconducting and photovoltaic properties of ZnO: TiO<sub>2</sub> composite/p-silicon heterojunction photodiode. Silicon, 10(3):781-787.

- Al-Ta'ii HMJ, Periasamy V, Amin YM, 2016. Electronic Characterization of Au/DNA/ITO Metal-Semiconductor-Metal Diode and Its Application as a Radiation Sensor. PLOS ONE, 11(1):e0145423.
- Aldemir DA, Kökce A, Özdemir AF, 2017. Schottky diyot parametrelerini belirlemede kullanılan metotların geniş bir sıcaklık aralığı için kıyaslanması. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-1.
- Altındal Ş, Sevgili Ö, Azizian-Kalandaragh Y, 2019. A comparison of electrical parameters of Au/n-Si and Au/(CoSO<sub>4</sub>-PVP)/n-Si structures (SBDs) to determine the effect of (CoSO<sub>4</sub>-PVP) organic interlayer at room temperature. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 30(10):9273-9280.
- Aslan N, Kurt MŞ, Koç MM, 2022. Morpho-structural and optoelectronic properties of diamond like carbon-germanium (DLC-Ge) composite thin films produced by magnetron sputtering. Optical Materials, 126: 112229.
- Berglund CN 1966. Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. IEEE Transactions on Electron Devices, 13:701-705.
- Cavalcoli D, Impellizzeri G, Romano L, Miritello M, Grimaldi MG, Fraboni B, 2015. Optical properties of nanoporous germanium thin films. ACS applied materials & interfaces, 7(31):16992-16998.
- Çetinkaya HG, Tecimer H, Uslu H, Altındal Ş, 2013. Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures. Current Applied Physics, 13(6):1150-1156.
- Chakhalia J, Liu X, Fiete GA, 2020. Strongly correlated and topological states in [111] grown transition metal oxide thin films and heterostructures. Applied Materials, 8(5):050904.
- Cheung SK, Cheung NW, 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. Applied Physics Letters, 49(2):85-87.
- Cong S, Geng F, Zhao Z, 2016. Tungsten oxide materials for optoelectronic applications. Advanced Materials, 28(47):10518-10528.
- Farag A, 2009. Structure and transport mechanisms of Si/porous Si n-p junctions prepared by liquid phase epitaxy. Applied Surface Science, 255(6):3493-3498.
- Firat YE, 2020. Elektrodepozisyon Yöntemiyle Bakır Katkılı Tungsten Oksit (Cu: WO<sub>3</sub>) İnce Filmlerinin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(1): 234-241.
- Gündüz B, Turan N, Kaya E, Çolak N, 2013. The photo-electrical properties of the p-Si/Fe(II)-polymeric complex/Au diode. Synthetic Metals, 184:73-82.
- Gunduz B, Yahia IS, Yakuphanoglu F, 2012. Electrical and photoconductivity properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al organic devices: Comparison study. Microelectronic Engineering, 98:41-57.
- Hai Z, Wei Z, Xue C, Xu H, Verpoort F, 2019. Nanostructured tungsten oxide thin film devices: From optoelectronics and ionics to iontronics. Journal of Materials Chemistry C, 7(42):12968-12990.
- Inamdar SI, Ganbavle VV, Rajpure KY, 2014. ZnO based visible-blind UV photodetector by spray pyrolysis. Superlattices and Microstructures, 76:253-263.
- Jazmati AK, Abdallah B, 2018. Optical and structural study of ZnO thin films deposited by RF magnetron sputtering at different thicknesses: a comparison with single crystal. Materials Research, 21(3): e20170821.
- Ji H, Zeng W, Li Y, 2019. Gas sensing mechanisms of metal oxide semiconductors: a focus review. Nanoscale, 11(47):22664-22684.

- Kalanur SS, Seo H, 2019. Aligned nanotriangles of tantalum doped tungsten oxide for improved photoelectrochemical water splitting. *Journal of Alloys and Compounds*, 785:1097-1105.
- Kampen TU, Park S, Zahn DRT, 2002. Barrier height engineering of Ag/GaAs(100) Schottky contacts by a thin organic interlayer. *Applied Surface Science*, 190(1):461-466.
- Karabat MF, Arsel İ, 2015. Al/CuO/p-Si/Al Diyot Yapısının Elektriksel Özellikleri. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 5(1):40-53.
- Krammer A, Magrez A, Vitale WA, Mocny P, Jeanneret P, Guibert E, Whitlow HJ, Ionescu AM, Schüller A, 2017. Elevated transition temperature in Ge doped VO<sub>2</sub> thin films. *Journal of Applied Physics*, 122(4):045304.
- Kulkarni S, Mane A, Navale S, Kulkarni P, Mulik R, Patil V, 2015. Synthesis, structural, compositional, morphological and optoelectronic properties of tungsten oxide thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(2):1087-1096.
- Kurt MŞ, Arslan ME, Yazici A, Mudu İ, Arslan E, 2021. Tribological, biocompatibility, and antibiofilm properties of tungsten–germanium coating using magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32(1):1-12.
- Lapa HE, Kökce A, Aldemir DA, Özdemir AF, Altındal Ş, 2020. Effect of illumination on electrical parameters of Au/(P3DMTFT)/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Indian Journal of Physics*, 94(12):1901-1908.
- Lee SM, Park SJ, Lee KH, Park JS, Park S, Yi Y, Kang SJ, 2015. Enhanced photocurrent of Ge-doped InGaO thin film transistors with quantum dots. *Applied Physics Letters*, 106(3):031112.
- Lee YS, Gershon T, Gunawan O, Todorov TK, Gokmen T, Virgus Y, Guha S, 2015. Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> thin-film solar cells by thermal co-evaporation with 11.6% efficiency and improved minority carrier diffusion length. *Advanced Energy Materials*, 5(7):1401372.
- Li G, Kim TW, Inoue S, Okamoto K, Fujioka H, 2006. Epitaxial growth of single-crystalline AlN films on tungsten substrates. *Applied Physics Letters*, 89(24): 241905.
- Lu HH, Xu JP, Liu L, 2016. Using Ge-doped La-Oxynitride as interfacial passivation layer for GaAs metal-oxide-semiconductor capacitors. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 16(4):617-621.
- Makino H, Shimizu H, 2018. Influence of crystallographic polarity on the opto-electrical properties of polycrystalline ZnO thin films deposited by magnetron sputtering. *Applied surface science*, 439:839-844.
- Ocak YS, Kulakci M, Kılıçoğlu T, Turan R, Akkılıç K, 2009. Current–voltage and capacitance–voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode. *Synthetic Metals*, 159(15-16):1603-1607.
- Patel A, Pataniya P, Solanki GK, Sumesh CK, Patel KD, Pathak VM, 2019. Fabrication, photoresponse and temperature dependence of n-VO<sub>2</sub>/n-MoSe<sub>2</sub> heterojunction diode. *Superlattices and Microstructures*, 130:160-167.
- Philipp H, Taft E, 1959. Optical constants of germanium in the region 1 to 10 eV. *Physical Review*, 113(4):1002.
- Pradeep I, Kumar ER, Suriyanarayanan N, Srinivas C, Mehar M, 2018. Effects of doping concentration on structural, morphological, optical and electrical properties of tungsten doped V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods. *Ceramics International*, 44(6):7098-7109.
- Rajagopal Reddy V, Prasad C, Janardhanam V, Choi CJ, 2021. Electrical and carrier transport properties of Ti/ $\alpha$ -amylase/p-InP MPS junction with a  $\alpha$ -amylase polymer interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32:1-14.

- Reus WF, Thuo MM, Shapiro ND, Nijhuis CA, Whitesides GM, 2012. The SAM, Not the Electrodes, Dominates Charge Transport in Metal-Monolayer//Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Gallium–Indium Eutectic Junctions. *ACS Nano*, 6(6):4806-4822.
- Rhoderick EH, 1982. Metal-semiconductor contacts. *IEE Proceedings I-Solid-State and Electron Devices*, 129(1):1.
- Serkan U, Coşkun B, İlhan M, Koc MM, 2021. Optoelectronic Properties of ZnO: TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Thin Films. *Journal Of Materials and Electronic Devices*, 5(1):21-27.
- Smirnov M, Baban C, Rusu G, 2010. Structural and optical characteristics of spin-coated ZnO thin films. *Applied surface science*, 256(8):2405-2408.
- Tung R, 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23):13509.
- Ünal F, 2021. Investigation Of Some Optical and Electrical Properties of InSe Thin Film, a Window Layer for Photovoltaic Cell Growth on Glass/GaSe Substrate by M-CBD Method. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1):297-306.
- Ünal F, Demir S, Mammadov H, 2021. Structural, surface morphological, optical and electrical properties of In<sub>x</sub>Se<sub>y</sub> thin films, an absorber layer for photovoltaic cells fabricated by M-CBD method using different variables. *Turkish Journal of Chemistry*, 45(6):1761-1773.
- Wagle S, Shirodkar V, 2000. Space-charge-limited conduction in thin film Al/Sb<sub>2</sub>Pb<sub>1</sub>Se<sub>7</sub>/Al devices. *Brazilian Journal of physics*, 30(2):380-385.
- Yavuz A, Ozdemir N, Erdogan PY, Zengin H, Zengin G, Bedir M, 2019. Nickel-based materials electrodeposited from a deep eutectic solvent on steel for energy storage devices. *Applied Physics A*, 125(8):1-10.
- Zurnacı M, Ünal F, Demir S, Gür M, Şener N, Şener İ, 2021. Synthesis of a new 1,3,4- thiadiazole-substituted phenanthroimidazole derivative, its growth on glass/ITO as a thin film and analysis of some surface and optoelectronic properties. *New Journal of Chemistry*, 45(48):22678-22690.