

Al/P-Si/ZnO/Al Foto Diyotun Üretimi ve Elektriksel Karakterizasyonu

Mehmet ÇAVAŞ

Department of Mechatronics Engineering Faculty of Technology, Firat University, Elazig, Turkey
mcavas23@hotmail.com

(Geliş/Received:21.11.2016; Kabul/Accepted:01.03.2017)

Özet

Bu çalışmada Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot spin coating yöntemi kullanılarak üretildi. Foto diyot ışığa duyarlı davranış göstererek ışık şiddetinin artışına bağlı olarak ters yön akımı arttı. Bu durum, üretilen diyotun foto diyot veya foto sensör olarak kullanılabilceğini gösterdi. Diyotun ters yön akımı 100 mW/cm² ışık şiddeti altında 1.8x10⁻³ ampere kadar yükseldi. Ayrıca üretilen ZnO ince filmin yüzey yapısı AFM ile incelendi ve film yapısının nanofiber olduğu görüldü. Nanofiberlerin ortalama kalınlığı yaklaşık 2.75 nm olarak ölçüldü. ZnO ince filmin UV ölçümleri yapıldı ve geçirgenlik oranının yaklaşık %85 olduğu görüldü. Ayrıca foto diyotun yasak enerji aralığı hesaplanarak 3.35 eV bulundu. Diyotun engel yüksekliği, idealite faktörü parametreleri termiyonik emisyon modeli kullanılarak sırası ile 4.5 ve 0.72 eV olarak hesaplandı. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun optik ve elektriksel I-V, C-V vb. grafikleri çizildi.

Anahtar kelimeler: Nano malzeme, Optik Sensor, Foto Diyot

Fabrication and Electrical Characterization of Al/p-Si/ZnO/Al Photo Diode

Abstract

In this study sol-gel spin coating technique used to fabricate Al/p-Si/ZnO/Al photo diode. The photo diode is exhibited a sensitive to the intensity of illumination behavior. The current is increased with increasing intensity of illumination. This situation shows that it may be used as a photo diode or photo sensor. The same time the Al/p-Si/ZnO/Al photo diode exhibits a photo conducting behavior with a high photosensitivity value of 1.83x10⁻³ at the 100 mW/cm². The morphological properties of the ZnO thin film surface were analyzed by Atomic Force Microscopy (AFM). The surface structure of the ZnO film was found to be as a nanofiber. The nanofiber size was found to be on average about 2.75 nm. The optical transmittance of ZnO thin film spectrum indicates about %85. The band gap of ZnO thin film was calculated using optical data and it was found to be about 3.35 eV. The D_{it} value of Al/p-Si/ZnO/Al photo diode is decreased with increasing frequency. Besides the Al/p-Si/ZnO/Al photo diode parameters such as ideality factor and barrier height were counted using thermionic emission model and these values were obtained to be 4.7 and 0.72 eV, respectively. The optical and electrical characterization of the Al/p-Si/ZnO/Al photo diode was performed using current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) and serial resistance (R-S).

Keywords: Nano materials, Optical sensor, Photo diode

1. Giriş

Son yıllarda nanoyapılı malzemelerin üretimi ve farklı alanlarda farklı uygulamalar için birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların yoğun bir şekilde yapılmasının önemli nedenlerinden biri nanoyapılı malzemelerin elektriksel ve optik özelliklerinin tane boyutu ile kontrol edilebilmesidir. Bu durum nanoyapılı malzemenin tane boyutu ve

yapısına bağlı olarak farklı uygulamalar için kullanılabilme imkânı sunmaktadır. Bu yüzden nanoyapılı malzemeler özellikle farklı elektronik devre uygulamaları için kullanılacak elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılması tercih edilmektedir. Özellikle son yıllarda tercih edilen transparant iletkenlerden biride ZnO dur. Bilindiği gibi ZnO n-tipi bir yarıiletken olup yasak enerji aralığı E_g =3.37 eV ve uyartım (eksiton) enerjisi yaklaşık 60 meV'tur [1-5]. Son

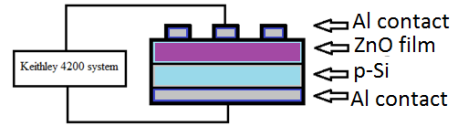
yıllarda ZnO özellikle varistörler, gaz sensörleri, optik sensörler, transistör ve güneş panelleri gibi birçok elektronik devre elemanının yapımında kullanılmaktadır. Öte yandan ZnO ince film birçok avantaja sahiptir. Örneğin ucuz olması, kolay işlenebilir olması vb. özelliklerinden dolayı birçok bilim insanının dikkatini çekmiş ve birçok bilim insanı farklı yöntemler kullanarak nanoyapılı ZnO ince film üreterek farklı uygulamalar için kullanmış ve kullanmaya da devam etmektedir. ZnO ince film üretmek için kullanılan bazı teknikler, örneğin sol-gel spin coating tekniği, radio frequency sputtering [3], DC magnetron sputtering pulsed laser deposition [2], chemical bath deposition, spray pyrolysis vb. yöntemlerdir [4]. Fakat bu teknikler arasında Sol-gel spin coating yöntemi diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahip olduğu görülmektedir [8]. Örneğin Sol-gel yöntemi ile düşük sıcaklıklarda kolay ve daha ucuz bir şekilde nanoyapılı malzeme üretilebildiği gibi çeşitli özelliklerde de nanofiber, nano parçacık vb. yapıya sahip nano malzeme üretilebilir [6-10]. Bu nedenle Sol-gel spin coating yöntemi farklı nanoyapılı malzemelerin üretimi için daha çok tercih edilmekte ve kullanılmaktadır.

Bu çalışmada temel amaç Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun üretilmesi ve üretilen bu diyotun optik ve elektriksel özelliklerinin araştırılarak optik eleman olarak kullanılıp kullanılmayacağına ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda üretilen Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G-V), seri direnç-gerilim (R_s -V), ara yüzey durum yoğunluğunun (D_{it}) belirlenmesi için farklı frekans ve farklı ışık şiddetleri altında çalışarak gerekli veriler elde edildi. Elde edilen veriler ve alınan sonuçlar kullanılarak foto diyotun parametreleri hesaplanarak ilgili grafikleri çizildikten sonra her bir grafik ayrı ayrı yorumlandı. Alınan sonuçlar Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı elektronik devreler için optik eleman veya optik sensör olarak kullanılabilirliğini gösterdi.

2. Materyal ve Metot

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun üretilmesi için Sol-gel spin coating yöntemi ve p- tipi Si altlık olarak kullanıldı. p- tipi Si'un kimyasal olarak temizlenmesi için RCA yöntemi kullanıldı.

Kimyasal olarak temizleme işlemi tamamlandıktan sonra azot gazı ile p-Si altlık kurularak omik kontak yapım aşamasına geçildi. Daha sonra buharlaştırma cihazı ile 4×10^{-5} torr vakum altında p-tipi Si arka yüzüne Al kullanılarak omik kontak yapıldı. Omik kontak yapıldıktan sonra 470°C de 3 dakika fırında bekletilerek p-Si tavlandı. Bu işlemlerden sonra Sol-gel yöntemi ile hazırlanan ZnO jel p-Si yüzüne spin coating kullanılarak 1000 rpm ve 20 saniyeye ayarlanmak suretiyle Si altlığın ön yüzüne ZnO ince film kaplanarak 150°C 5 dakika kurutulduktan sonra 450°C fırınlanarak foto diyotun üst kontağının yapımına hazır hale getirildi. Bu işlem tamamlandıktan sonra oluşturulan ZnO ince filmin üzerine maske konularak diyotun üst kontağı yine Al kullanılarak oluşturulmak sureti ile Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot elde edilerek elektriksel ve optik özelliklerinin ölçümleri yapıldı. Üretilen foto diyotun blok diyagramı şekil.1'de görülmektedir.

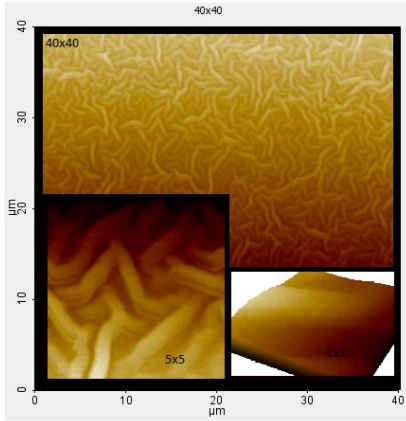


Şekil.1. Al/p-Si/ZnO/Al Foto diyotun blok diyagramı

ZnO ince filmin yüzey yapısı PARK sistem XEI 100E Atomik kuvvet mikroskobu ile analiz edildi. ZnO ince filmin oluşan nanofiber boyutunu hesaplamak için PARK sistem XEI yazılımı kullanıldı. Ayrıca üretilen Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun I-V, C-V, G-V, R-S vb. elektriksel ve optik özellikleri KEITLEY 4200 karakterizasyon sistemi kullanılarak gerekli ölçümler yapıldı. Bu ölçümler sonucunda alınan veriler kullanılarak ilgili grafikler çizilerek her bir grafik ayrı ayrı açıklandı.

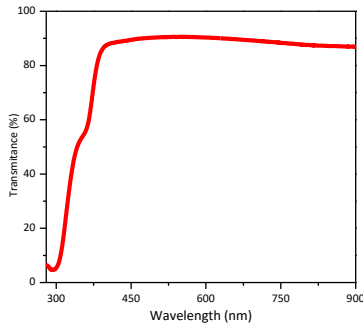
3. Bulgular

ZnO ince filmin yüzey yapısı PARK sistem XEI 100E Atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak analiz edildi. Elde edilen yüzey yapısı AFM görüntüsü şekil.2 de gösterildi. Şekil.2 de görüldüğü gibi nanoyapılı ZnO ince film nanofiber şeklinde oluşmuş olup fiberlerin ortalama kalınlığı 2.75 nm olarak ölçülmüştür.

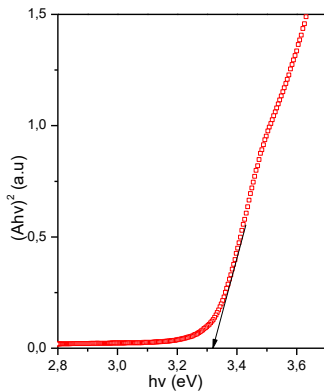


Şekil.2. ZnO ince filmin AFM görüntüsü

Nanoyapılı ZnO ince filmin optik özellikleri, yasak enerji aralığı (E_g) ve geçirgenliğinin belirlenmesi çalışıldı. Bu kapsamda Nanoyapılı ZnO ince filmin geçirgenlik spektrumu çizilerek şekil.3.a'da gösterildi. Şekil.3.a'da görüldüğü ZnO ince filmin geçirgenlik oranı yaklaşık olarak %85 tir.



(a)



(b)

Şekil.3. a. ZnO ince filmin geçirgenlik spektrumu
b. ZnO ince filmin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ spektrumu

Nanoyapılı ZnO ince filminin yasak enerji aralığı geçirgenliğin dalga boyu verileri kullanılarak hesaplandı. ZnO ince filmin soğurma katsayısı (α) ise denklem 1 kullanılarak hesaplandı.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{d} \quad (1)$$

Burada T geçirgenlik ve d ise ZnO ince filmin kalınlığıdır. Soğurma katsayısı ve foton enerjisi denklem 2 kullanılarak hesaplandı [10].

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

Burada A sabit değer, E_g Nanoyapılı ZnO ince filmin yasak enerji aralığı, n ise geçiş tipine bağlı değerdir. ZnO ince filmin yasak enerji aralığı grafiği şekil.3.b' de görülmektedir. ZnO ince filmin yasak enerji aralığı soğurmanın lineer bölgesinden belirlendi. Yasak enerji aralığı ise yaklaşık 3.35 eV olarak hesaplandı. Bulunan bu değer literatür değerleri ile uyumlu olup literatür değerinden daha küçüktür. Literatür değeri genellikle 3.37 eV olarak verilmektedir.

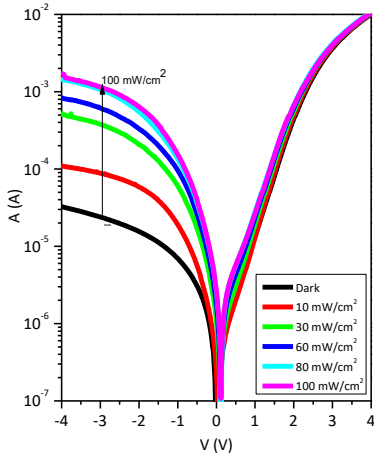
Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun Akım-Gerilim (I-V) karakteristiği karanlık ve çeşitli ışık şiddetleri altında çalışıldı. I-V karakteristiği şekil 4.'te gösterilmiştir. Şekil 4.'te görüldüğü gibi Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot ışığa duyarlı olup ışık şiddetinin değişimine bağlı olarak akımında değiştiği açıkça görülmektedir. Işık şiddetine bağlı olarak ters yön akımı değişen Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun optik davranışı termioyonik emisyon modeli ile analiz edildi. Burada akım ve gerilim değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [5,7],

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-q(V-IR_s)}{kT}\right)\right] \quad (3)$$

Burada n diyotun idealite faktörü, q elektrik yükü, k Boltzmann sabiti, T sıcaklık, V uygulanan gerilim, R_s seri direnç ve I_0 ise ters saturasyon akımıdır ki bu akım denklem 4 ile analiz edildi [1],

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \quad (4)$$

Burada ϕ_b engel yüksekliği A^* Richardson sabiti olup p tipi Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ve A ise diyotun kontak alanıdır. Al/p-Si/ZnO/Al Foto diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 4.7 ve 0.72 olarak hesaplandı. Şekil 4.'te de görüldüğü gibi Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun ters yön akımı ışık şiddetine bağlı olarak değişmekte ve ışık şiddeti arttıkça ters yön akımda artmaktadır. En büyük ışık şiddeti değeri olarak uygulanan 100 mW/cm^2 altında foto diyotun ters yön akımının $1.83 \times 10^{-3} \text{ A}$ kadar arttığı görülmektedir. Bu durum üretilen Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun akımının ışık şiddetine bağlı olarak değiştiğini bu nedenle farklı opto elektronik devrelerde farklı uygulamalar için kullanılabileceğini göstermektedir.



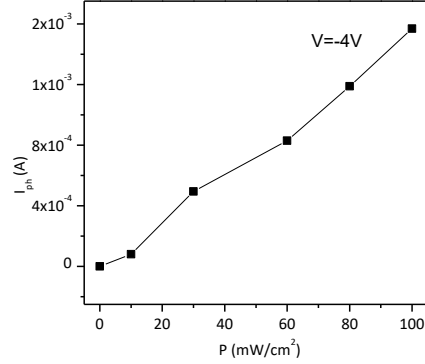
Şekil.4. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı ışık şiddetleri altındaki I-V akım grafiği.

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun -4 V gerilim değerine göre foto akım grafiği şekil.5'te görülmektedir. Şekil 5'te de görüldüğü gibi fotoakım, ışık şiddetine bağlı olarak değişmekte ve artan ışık şiddeti ile fotoakımında arttığı görülmektedir. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun fotoakımı aşağıdaki denklem 5 ile analiz edildi [5],

$$I_{ph} = AP^m \quad (5)$$

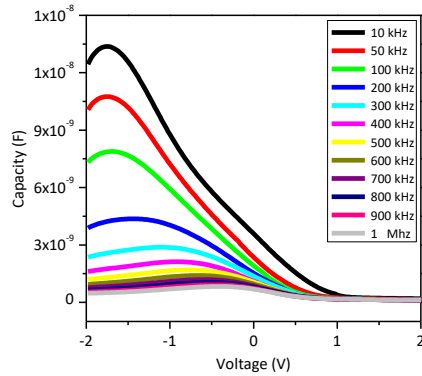
Burada I_{ph} fotoakım, A bir sabit, m eksponent ve P değeri ise ışık şiddetidir. Burada m değeri $\text{Log}(I_{ph})$ ve $\text{Log}(P)$ 'nin eğiminden hesaplanarak 1.5 olarak bulundu. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun fotoakımı ışığın uygulanması ile yükseldi ve ışık kapatıldığında ise fotoakım başlangıç değerine geri düştü. Bu şekilde ışığa bağlı olarak akımda

oluşan bu değişim üretilen foto diyotun foto iletkenlik özelliği gösterdiğini ve bu yüzden foto diyot veya foto sensör olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil.5. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun I_{ph} -P grafiği

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı frekanslar altında çizilen kapasite-gerilim (C-V) grafiği şekil.6' da görülmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi foto diyotun kapasitesi uygulanan gerilimin pozitif bölgesinde frekansa bağlı olarak değişmezken gerilimin negatif bölgesinde ise kapasitenin frekansa bağlı olarak değiştiği bu değişimin şekil 6 da görüldüğü gibi kapasitenin frekansın azalması ile arttığı görülmektedir.



Şekil.6. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun farklı frekanslar altında çizilen C-V grafiği

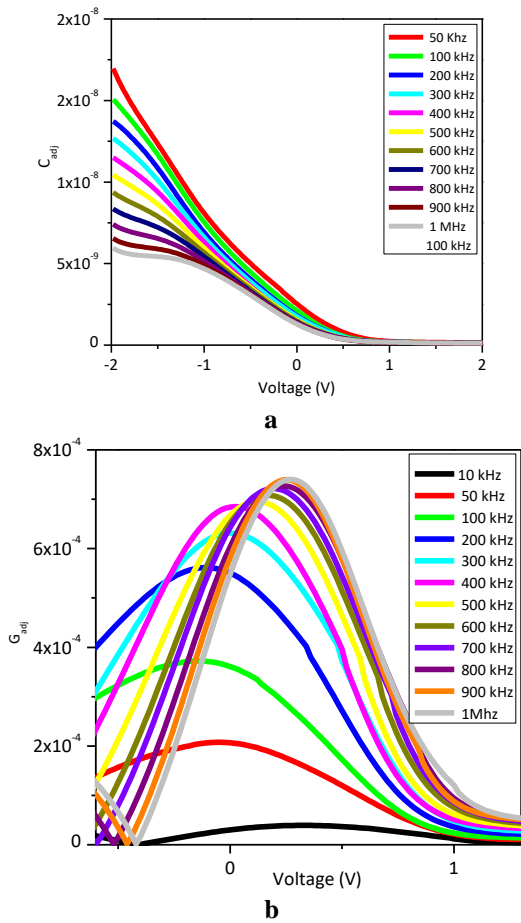
Şekil 7 a ve b'de görülen foto diyotun C-V ve G-V grafikleri denklem 6 ve denklem 7 kullanılarak düzeltildi [5],

$$C_{adj} = \frac{(G_m^2 + (WC_m)^2)C_m}{a^2 + (WC_m)^2} \quad (6)$$

$$G_{adj} = \frac{(G_m^2 + (WC_m)^2)a}{a^2 + (WC_m)^2} \quad (7)$$

Burada C_{adj} düzeltilen kapasitans, G_{adj} düzeltilen iletkenlik, C_m ölçülen kapasite, G_m ölçülen iletkenlik, w açılal frekans, a C_m , G_m ve R_s ye bağlı ayarlanabilir parametre olup bu parametre denklem 8 ile hesaplanabilir.

$$a = G_m - (G_m^2 + (WC_m)^2)R_s \quad (8)$$



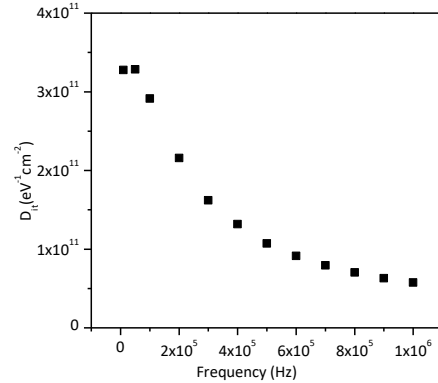
Şekil.7. a. Al/p-Si/ZnO/Al Foto diyotun farklı frekanslarda çizilen C_{adj} , b. G_{adj} grafikleri

Şekil 7b’de çizilen G_{adj} grafiğinde pikin oluştuğu görülmektedir ki bu yapı ara yüzey durum yoğunluğunun olduğunu göstermektedir. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun ara yüzey durum yoğunluğu denklem 9 ile hesaplandı [5]

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left[\frac{(G_{adj}/w)_{max}}{[(G_{max}/wC_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \right] \quad (9)$$

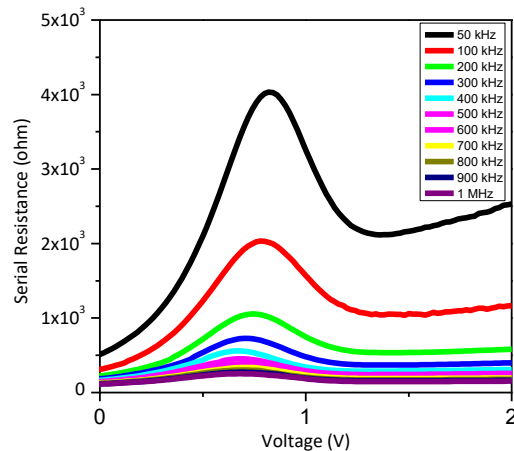
Burada C_m ölçülen kapasite, C_{ox} izolasyon tabakasının kapasitesi, w açılal frekans, A ise foto

diyotun kontak alanıdır. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun ara yüzey durum yoğunluğu D_{it} G_{adj} -V grafiği ve denklem 9 kullanılarak hesaplandı. Ara yüzey durum yoğunluğu grafiği şekil.8 de görülmektedir. Şekil.8’ de görüldüğü gibi Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun ara yüzey durum yoğunluğu artan frekans ile azaldığı şekil.8’ de açıkça görülmektedir.



Şekil.8. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun D_{it} grafiği

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun R_s -V grafiği çizilerek şekil.9’da gösterildi. Şekilde de görüldüğü gibi foto diyotun R_s değeri birikim bölgesindeki kapasite ve iletkenlik değerlerinden ölçüldü. Şekil.9’da görüldüğü gibi R_s değeri pik gösterdi ki bu yapı frekans değerinin yükselmesi ile azaldı. Bu değişim ara yüzeydeki elektrik yüklerinin uygulanan gerilime bağlı olarak frekans değişimini takip edebildiğini göstermektedir. Ayrıca şekil.9’da görüldüğü gibi foto diyotun seri direncinin yükselen frekans değerine bağlı olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil.9. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun R_s - V

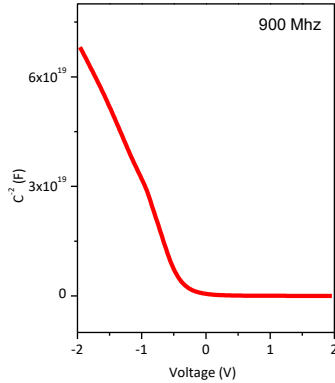
Al/p-Si/ZnO/Al Foto diyotun C^{-2} -V grafiği 900 kHz frekansta çizildi. Çizilen grafik şekil.10'da gösterilerek diyotun elektriksel parametreleri olan built-in potansiyeli taşıyıcı konsantrasyonu bu grafik kullanılarak belirlendi. Al/p-Si/ZnO/Al Foto diyotun built-in potansiyeli ve taşıyıcı konsantrasyonu denklem 10 kullanılarak hesaplandı.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi}+V)}{A^2 \epsilon_s q N_a} \quad (10)$$

Burada V_{bi} built-in potansiyeli, ϵ_s dielektrik sabiti ki p-Si için $\epsilon_s = 11.8$ ' dir [19. N_a alıcı konsantrasyonu, q elektrik yükü ($1.6 \cdot 10^{-19}$ eV), Foto diyotun V_{bi} değeri 0.35 eV olarak hesaplandı. Öte yandan foto diyotun engel yüksekliği olan $\Phi_{b(c-v)}$ ise denklem 11 kullanılarak hesaplandı [2],

$$\Phi_{b(c-v)} = V_{bi} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (11)$$

Burada N_v yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu olup p-Si için $1.82 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ tür, V_{bi} built-in potansiyelidir. Denklem 11 kullanılarak foto diyotun hesaplanan bariyer yüksekliği $\Phi_{b(c-v)}$ 0.94 eV olarak bulundu.



Şekil.10. Al/p-Si/ZnO/Al foto diyotun C^{-2} -V grafiği

4. Sonuç

Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot Sol-gel spin coating yöntemi kullanılarak üretildi. Foto diyotun elektriksel ve optiksel özellikleri farklı ışık şiddetleri ve farklı frekanslar altında yapılan ölçümlerde elde edilen veriler kullanılarak araştırıldı. İdealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplandı sırası ile 4.7 ve 0.72 eV olarak bulundu. Bu çalışmada elde edilen elektriksel ve

optik sonuçlar değerlendirildiğinde Al/p-Si/ZnO/Al foto diyot geliştirilebilir ve farklı elektronik devrelerin oluşturduğu farklı uygulamalar için foto diyot veya foto sensör olarak kullanılabilir olduğunu gösterdi.

5. Kaynaklar

1. Zhu R., Zhang X., Zhao J., Li R., Zhang W., 2015 Influence of Illumination Intensity on The Electrical Characteristics and Photo Responsivity of the Ag/ZnO Schottky Diodes, *Journal of Alloys and Compounds* **631**, 125-128
2. Tsiarapas C., Girginoudi D., Georgoulas N., 2014, Electrical characteristics of Pd Schottky Contacts on ZnO films, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **17**, 199-206
3. Rajan L., Periasamy C., Sahula V., 2016, Electrical Characterization of Au/ZnO thin Film Schottky Diode on Silicon Substrate, *Perspective in Science*, Article in press
4. Nagayasamy N., Gandhimathination S., Veerasamy V., 2013, The Effect of ZnO Thin Film and Its Structural and optical Properties Prepared by Sol-Gel Spin Coating Method, *open journal of Metal* **3**, 8-11
5. Yakuphanoğlu F., Farooq A.W, 2011, Photoresponse and Electrical Characterization of Photo Diode based nanofibers ZnO and Si, *Material Science in Semiconductor Processing*, **14**, 207-211
6. Moditswe C., Muiva M. C., Juma A., 2016, Highly Conductive and Transparent Ga doped ZnO Thin Films Deposited by Chemical Spray Pyrolysis, *Optik*, 8317-8325
7. Zhang X., Zhai J., Yu X., Ding L., Zhang W., 2013, Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates, *Thin Solid Films* **548**, 623-626
8. Agarwal L., Singh K.B, Tripathi S., Chakrabarti P., 2016, Fabrication and characterization of Pd/Cu doped ZnO/Si and Ni/Cu doped ZnO/Si Schottky diodes, **612**, 259-266
9. Kim S.Y, Tai P.W., 2007, Electrical and optical properties of Al-doped ZnO thin films by sol-gel process, *Applied Surface Science* **253**, 4911-4916
10. Singh K. B., Tripathi S., 2015, Fabrication and characterization of Au/p-ZnO Schottky contacts, *Superlattices and Microstructures*, **85**, 697-706