



Sol-Jel Yöntemi ile Üretilen ZnO(Al)/p-Si Heteroekleminin Elektriksel Karakterizasyonu

Namık AKÇAY*¹

¹*İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 34134, İstanbul, Türkiye*
**yazışılan yazar e-posta: akcay@istanbul.edu.tr*

(Alınış: 21.09.2018, Kabul: 05.11.2018, Yayınlanma: 30.11.2018)

Özet: Bu çalışmada, p-tipi Silisyum (p-Si) üzerine katkısız Çinko Oksit (ZnO) ve %2 Alüminyum katkılı çinko oksit (AZO) kaplanarak oluşturulan heteroeklemlerin elektriksel özellikleri incelenmiştir. ZnO ve AZO nanoparçacıklar Sol-Jel yöntemi ile sentezlenmiş ve ZnO/p-Si, AZO/p-Si heteroeklemleri döndürme kaplama tekniği ile oluşturulmuştur. Kaplama sonrası örnekler 450 °C’de 30 dk termal tavlama işlemi uygulanmıştır. 10K-300K aralığında alınan Akım-Voltaj (I-V) ve Kapasitans-Voltaj (C-V) ölçümleri örneklerin çok düşük sızıntı akımına sahip diyot davranışı sergilediğini göstermektedir. C-V ölçüm sonuçlarından diyotların kontak potansiyeli (built-in potential, V_{bi}) ve taşıyıcı konsantrasyonları (N_d) hesaplandı. Derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) tekniği ile arınma bölgesi civarında bulunan tuzak seviyeleri araştırılmıştır. Her iki örnekte de elektron tuzaklarının varlığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: ZnO ince film, Al katkılama, ZnO/p-Si heteroeklemi, DLTS.

Electrical Characterization of ZnO (Al) / p-Si Heterojunctions Fabricated by Sol-Gel Method

Abstract: In this work, the electrical properties of heterojunctions formed by coating of undoped Zinc Oxide (ZnO) and 2% Aluminum doped zinc oxid (AZO) on p-type silicon (p-Si) were investigated. ZnO and AZO nanoparticles were synthesized by Sol-Gel method and ZnO / p-Si, ZnO (Al) / p-Si heterojunctions were formed by spin coating technique. After the coating, the samples were thermally annealed at 450 °C for 30 minutes. Current-Voltage (I-V) and Capacitance-Voltage (C-V) measurements taken at 10K-300K show that the samples exhibit diode behavior with very low leakage current. Built-in potential (V_{bi}) and carrier concentrations (N_d) of diodes were calculated from C-V measurement results. Deep level transition spectroscopy (DLTS) technique was used to investigate trap levels around the depletion region. The presence of electron traps in both samples was determined.

Key words: ZnO thin film, Al doping, ZnO/p-Si heterojunction, DLTS.

1. Giriş

Çinko oksit (ZnO) IV-VI grubu bileşiklerinden, geniş bant aralıklı (3.37eV), direk geçişli bir yarıiletkenidir[1]. ZnO ince filmler, düşük maliyetle üretilebilmeleri, yüksek kimyasal dayanıklılığa sahip olmaları ve birçok cihaz üretiminde kullanılma potansiyelleri nedeniyle oldukça ümit vaat eden malzemelerdir [2].

ZnO n-tipi yarıiletkenidir. Katılama yapılarak yüksek dirençli ya da iletken ZnO ince film elde etmek mümkündür. Örneğin düşük miktarda Alüminyum (Al) katkılanarak yüksek elektrik iletkenliğine sahip ZnO filmler oluşturulabilir [3]. ZnO sahip olduğu geniş bant aralığı sayesinde görünür bölgede (400-700nm) şeffaftır. Böylelikle, dokunmatik ekranlarda şeffaf iletken oksit (TCO) olarak kullanılabilir [4]. Son yıllarda ZnO filmler, gaz sensörleri [5], UV detektörler [6], alan etkili transistörler (FET) [7], nem sensörleri [8, 9] ve güneş pilleri [10] gibi birçok aygıt yapımında kullanılmaktadır.

Literatürde p-tipi ZnO üretimi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ancak p tipi üretildiğinde bile zamanla n-tipi olduğu rapor edilmektedir [11, 12]. Bu nedenle p-n eklemi oluşturabilmek için ZnO filmlerin başka bir p-tipi yarı iletken üzerine kaplamak gerekir.

Silisyum doğada bol bulunan ve özellikleri iyi bilinen bir elementtir. Si katkılanarak hem n tipi hem de p tipi yarıiletken olarak üretilebilmektedir. Günümüz yarıiletken teknolojisinin vazgeçilmezi olan Silisyum, birçok aygıtın (işlemciler, flaş bellekler, güneş hücreleri) temel bileşenidir. Bu nedenle n tipi ZnO ile heteroeklem oluşturmak için p tipi silisyum tercih edilmiştir.

ZnO/p-Si heteroeklemini oluşturmak için literatürde Sol-jel/ döndürme kaplama[13], kimyasal buhar biriktirme (CVD) [14], sputter [15] ve sprej kaplama [16] gibi farklı birçok yöntem kullanılmıştır. Bunlar arasında sol-jel/döndürme kaplama yöntemi düşük üretim maliyetli ve kolay bir üretim tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada sol-jel/döndürme kaplama yöntemi kullanılarak ZnO/p-Si ve AZO/p-Si heteroeklemleri oluşturulmuştur.

ZnO/p-Si heteroeklemi kullanılarak üretilen aygıtlarda oluşabilecek kusur sevipleri aygıtların performansını düşürebilmektedir. Bu çalışmada ZnO/p-Si ve %2 Al katkılı AZO/p-Si heteroeklemleri üretilmiş ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan örneklerin sıcaklığa bağlı I-V ve C-V ölçümleri alınarak diyot karakteristikleri belirlenmiştir. Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) yöntemi ile ZnO/p-Si ve AZO/p-Si heteroeklemlerinin ara yüzeyinde bulunan tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjileri (E_a) ve yakalama tesir kesitleri (σ) hesaplanmıştır.

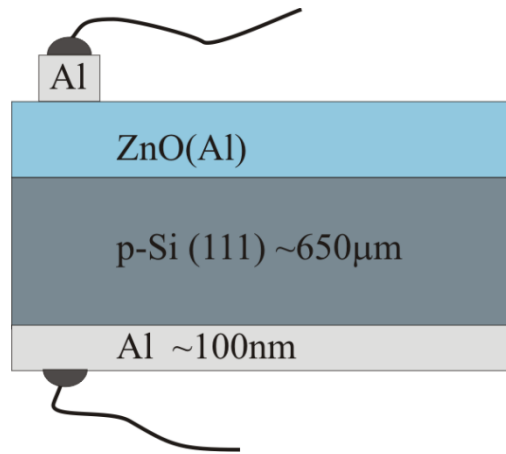
2. Materyal ve Metot

Katkısız ZnO ve %2 Al katkılı AZO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile sentezlendi. Çinko kaynağı olarak çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), Alüminyum kaynağı olarak Aluminum nitrate nonahydrate ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) ve çözücü olarak 2-Methoxyethanol ($CH_3OCH_2CH_2OH$) kullanılmıştır. Çözeltilerin konsantrasyonu 0.5M olarak hazırlanarak manyetik karıştırıcıda, 65 °C'ye kadar ısıtıldı. Çözeltilere birkaç damla monoetanolamine ($NH_2CH_2CH_2OH$) eklenerek 65 °C'de 1 saat süreyle karıştırma işlemine devam edildi. Sonuçta şeffaf ve homojen çözeltiler elde edildi. Çözeltiler 1 gün karanlık ortamda bekletildikten sonra kaplama işlemi gerçekleştirildi.

Kaplama işleminde alt tabaka olarak 5-10 Ω cm özdirence sahip, p-tipi Silisyum (111) wafardan kesilen 1x1 cm² büyüklüğündeki Si parçalar kullanıldı. Kaplama işleminden önce Si parçaların üzerindeki oksit tabakanın temizlenmesi için hidroflorik asit sulu çözeltisinde ($HF:H_2O = 1:10$) 2 dk bekletildi. Ardından sırasıyla aseton ve etil alkol banyosu ile temizlik işlemi tamamlandı. Daha sonra alt kontakların oluşturulması için örnekler kaplama cihazına konuldu. Edwards Model 6E kaplama cihazı kullanılarak

buharlaştırma yöntemi ile örneklerin bir yüzeyi 100 nm kalınlığında alüminyum ile kaplandı.

ZnO/p-Si ve AZO/p-Si heteroeklemleri, her bir örnek için 15 kat olacak şekilde döndürme kaplama yöntemi ile elde edilmiştir. Her bir kaplama adımından sonra örnekler kül fırında 200°C'de 5 dk bekletilerek kurutulmuştur. Kaplama işleminden sonra örnekler 450 °C'de açık atmosfer şartlarında 30 dk termal tavlama yapılmıştır. Üst kontağın oluşturulabilmesi için örnekler tekrar kaplama cihazına alınarak ZnO ve AZO filmlerin yüzeyi maske kullanılarak 5x5 mm² ölçülerinde 100 nm kalınlığında alüminyum ile kaplanmıştır. Elektriksel ölçümlerin alınabilmesi için gerekli olan alt ve üst kontaklar, örneklerin alt ve üst yüzeylerine bakır kabloların gümüş pasta ile yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Üretilen ZnO(Al)/p-Si heteroekleminin şematik gösterimi Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. ZnO(Al)/p-Si heteroekleminin şematik gösterimi.

Elektriksel ölçümler için örnekler ARS DE-202 kapalı devre soğutma sistemine yerleştirilerek 10K-350K aralığında I-V, C-V ve DLTS ölçümleri alınmıştır. I-V ölçümleri için Keithley 2400 model güç kaynağı/ölçü aleti kullanılmıştır. C-V ölçümleri için Agilent 3220a ve Boonton 7200 LRC kullanılmıştır. DLTS ölçümleri Agilent 81110a ve Boonton 7200 LRC kullanılarak yapılmıştır.

C-V ölçüm sonuçlarından yapıların taşıyıcı konsantrasyonu ve V_{bi} değerleri hesaplanmıştır. Bir heteroeklemden uygulanan gerilim (V) ile ölçülen kapasite (C) arasındaki ilişki aşağıdaki ifade ile verilir [17];

$$C^2 = \frac{A^2 q N_d N_a \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_0}{2(N_d \epsilon_1 + N_a \epsilon_2)(V_{bi} + V)} \quad (1)$$

burada A; heteroeklem alanı, N_a ; ($1.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) Si içerisindeki akseptör konsantrasyonu, N_d ; ZnO ya da AZO içerisindeki donör konsantrasyonu, ϵ_1 ; (8,5) ZnO için dielektrik sabiti [18], ϵ_2 ; (11,7) Si için dielektrik sabiti [19], ϵ_0 ; boşluğun dielektrik sabiti, q ; elektron yükünü ifade etmektedir. $1/C^2$ -V grafiğinden elde edilen doğrusal kısmın eğiminden N_d ve voltaj eksenini kestiği noktadan V_{bi} bulunmuştur.

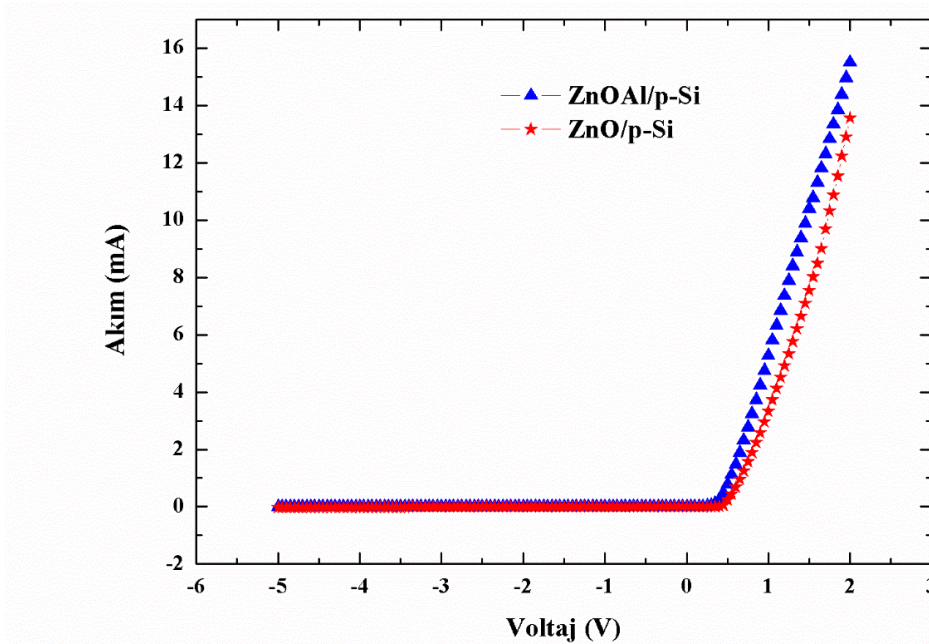
DLTS ölçüm sonuçlarından derin tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjisi (E_a) belirlenmiştir. DLTS teorisinde elektronun termal emisyon oranı e_a [20],

$$e_a = \gamma T^2 \sigma_{\infty} \exp(-E_a/kT) \quad (2)$$

ifadesiyle verilir. Burada σ_{∞} ; $T=\infty$ için yakalama tesir kesiti, γ ; sıcaklıktan bağımsız bir sabit, k ; Boltzmann sabiti ve T ; sıcaklığı göstermektedir.

3. Bulgular

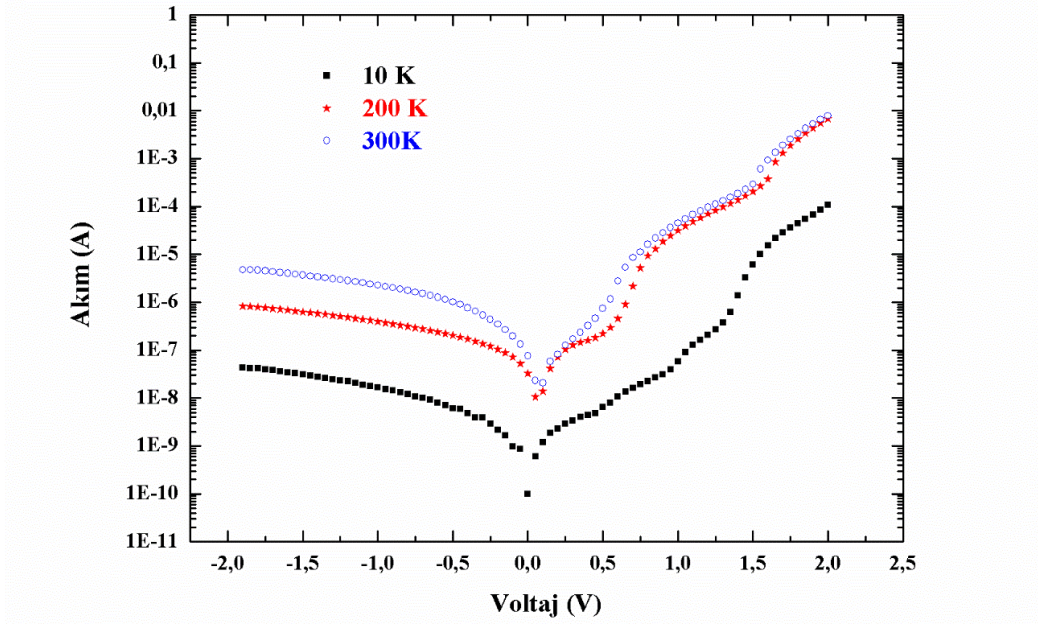
Şekil 2’de, ZnO/p-Si ve AZO/p-Si örneklerinin oda sıcaklığında, $-5V - +2V$ aralığında gerilim uygulanarak alınan Akım-Voltaj ölçüm sonuçları verilmiştir. Her iki örneğin de diyet karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. ZnO/p-Si ve AZO/p-Si örneklerinin oda sıcaklığında alınan I-V ölçüm sonuçları.

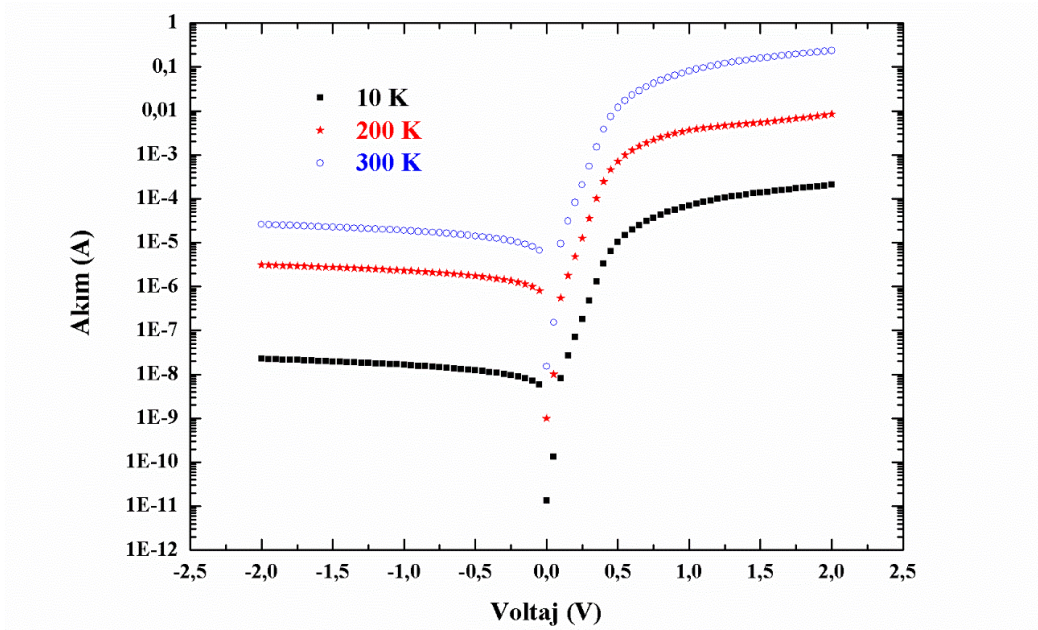
Örneklerin I-V ölçümlerinde $+2 V$ gerilim uygulandığında ZnO/p-Si yapısından 13.5 mA akım geçtiği, AZO/p-Si yapısından ise 15.5 mA akım geçtiği görülmektedir. $-5V$ gerilim uygulandığında elde edilen akım değerleri ZnO/p-Si örneği için $2.84 \times 10^{-6} \text{ A}$ ve AZO/p-Si örneği için de $2.67 \times 10^{-5} \text{ A}$ 'dir. Al katkılanan örnekte sızıntı akımının katkısız örneğe göre yaklaşık 10 kat arttığı bulunmuştur.

Şekil 3’de ZnO/p-Si yapısının farklı sıcaklıklarda alınan I-V sonuçları yarı logaritmik olarak verilmiştir. Ölçümler $\pm 2V$ gerilim uygulanarak alınmıştır. Geri besleme uygulandığında elde edilen akım değeri sıcaklık ile artmaktadır. Oda sıcaklığında $-2V$ gerilim değeri için 10^{-6} A mertebesinde oldukça düşük sızıntı akımı olduğu görülmektedir.



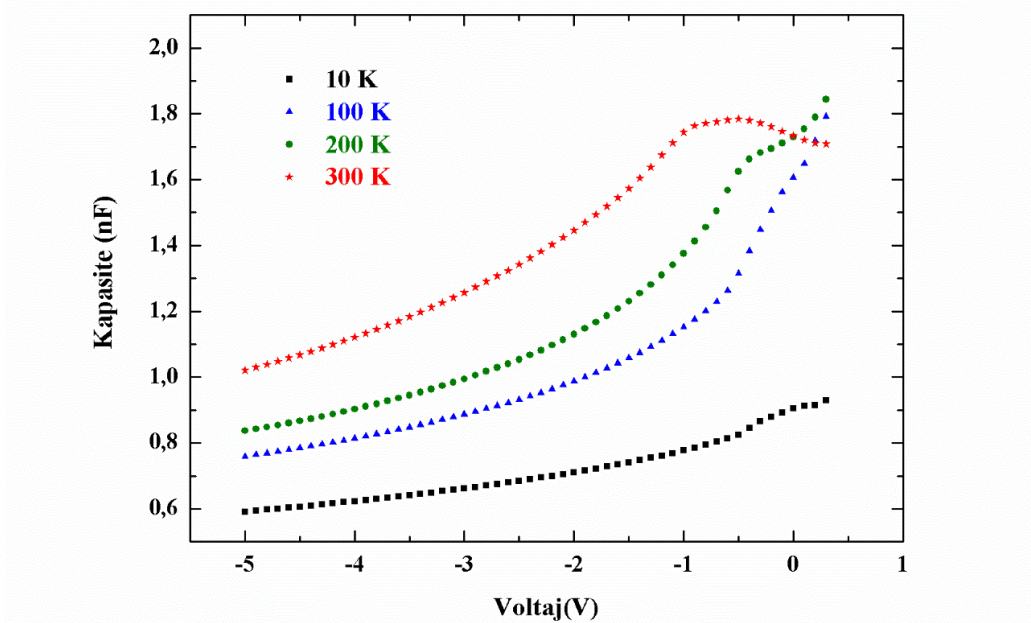
Şekil 3. ZnO/p-Si heteroekleminin farklı sıcaklıklarda alınan I-V ölçüm sonuçları.

Şekil 4'te AZO/p-Si örneği için farklı sıcaklıklarda alınan I-V sonuçları yarı logaritmik olarak verilmiştir.



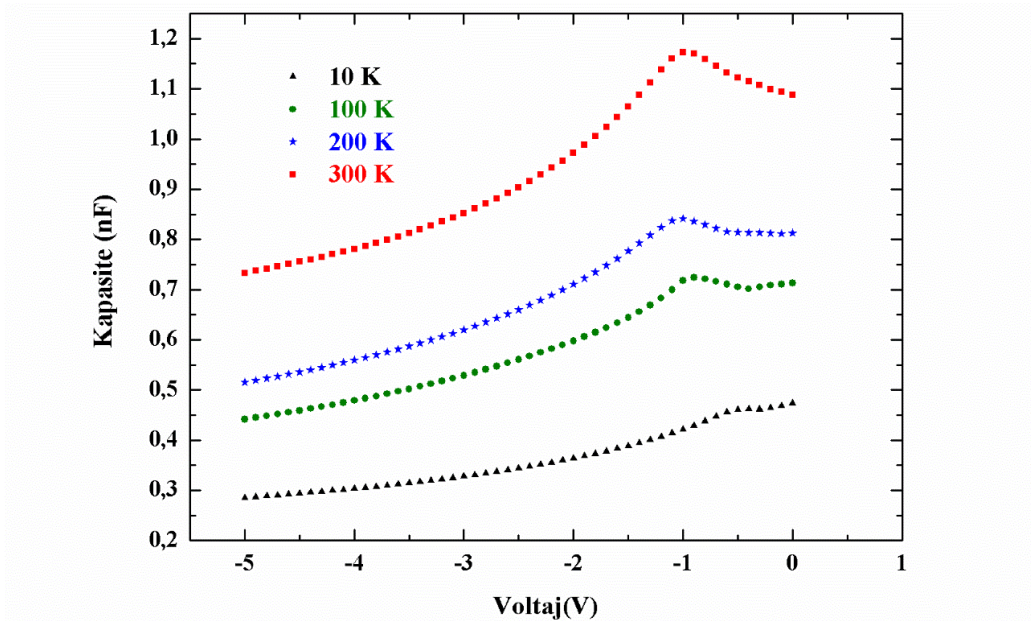
Şekil 4. AZO/p-Si heteroekleminin farklı sıcaklıklarda alınan I-V ölçüm sonuçları.

$\pm 2V$ gerilim uygulanarak alınan ölçümlerden geri besleme uygulandığında oda sıcaklığında 10^{-5} A mertebesinde sızıntı akımı olduğu görülmektedir. Şekil 5'te ZnO/p-Si yapısının farklı sıcaklıklarda alınan C-V sonuçları verilmiştir.



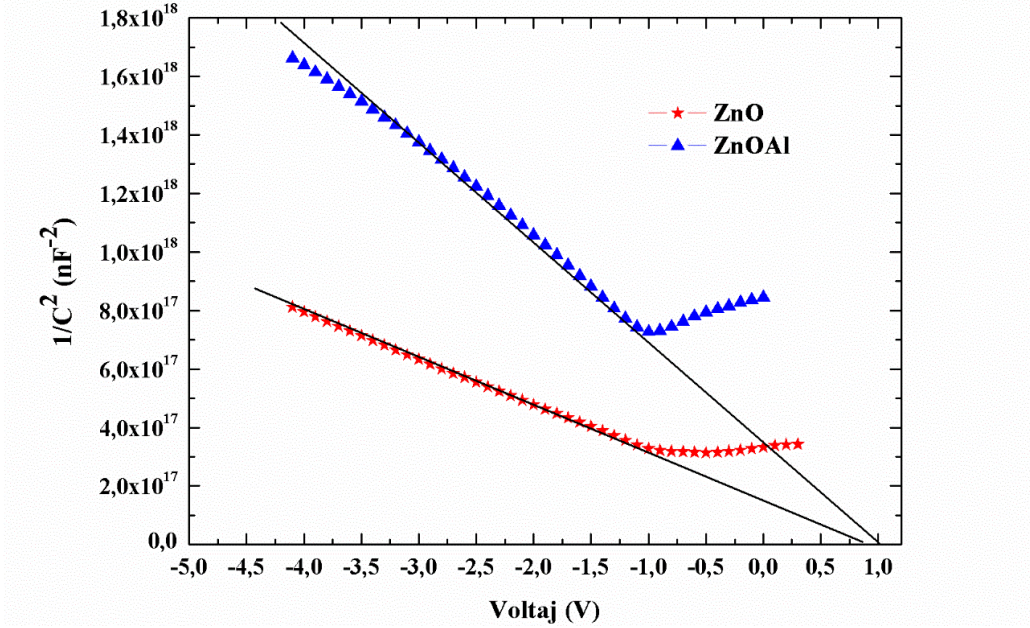
Şekil 5. ZnO/p-Si heteroekleminin farklı sıcaklıklarda alınan C-V ölçüm sonuçları.

Şekil 6.'da AZO/p-Si örneğinin farklı sıcaklıklarda alınan C-V sonuçları verilmiştir.



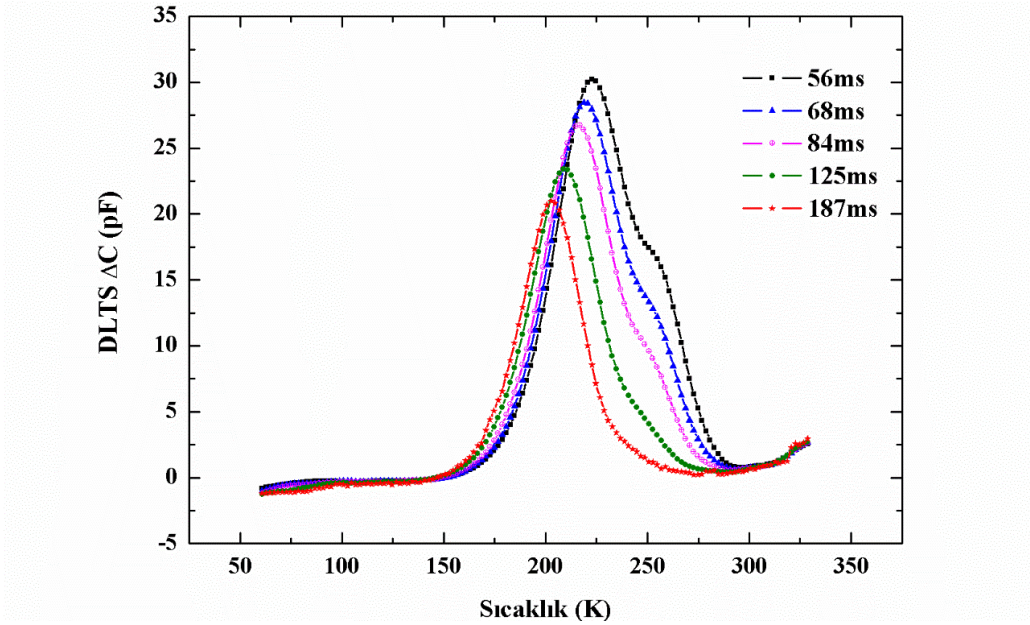
Şekil 6. AZO/p-Si heteroekleminin farklı sıcaklıklarda alınan C-V ölçüm sonuçları

C-V sonuçlarından her iki örneğinde diyot karakteristiği gösterdiği ve ölçülen sıcaklık değerlerinde uygulanan voltaja bağlı olarak kapasite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 7'de ZnO/p-Si ve AZO/p-Si örneklerinin oda sıcaklığında $1/C^2$ -V grafiği gösterilmektedir. $1/C^2$ -V grafiğinden elde edilen doğrusal kısmın voltaj eksenini kestiği noktadan V_{bi} bulunmuştur. V_{bi} değerleri ZnO/p-Si yapısı için 0.86V ve AZO/p-Si yapısı için de 0.96V olarak bulunmuştur. Denklem 1. kullanılarak ZnO ve AZO filmlerin taşıyıcı konsantrasyonları hesaplanmıştır. ZnO için taşıyıcı konsantrasyonu $1.55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve AZO için taşıyıcı konsantrasyonu da $3.52 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur.



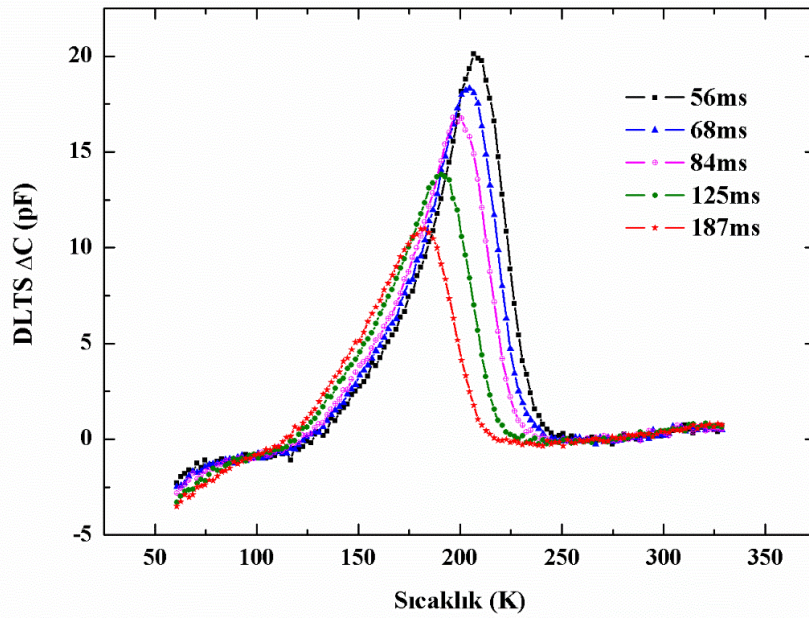
Şekil 7. ZnO/p-Si ve AZO/p-Si heteroeklemlerinin oda sıcaklığında $1/C^2$ -V grafiği.

Şekil 8.'de ZnO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçları grafiği verilmektedir.



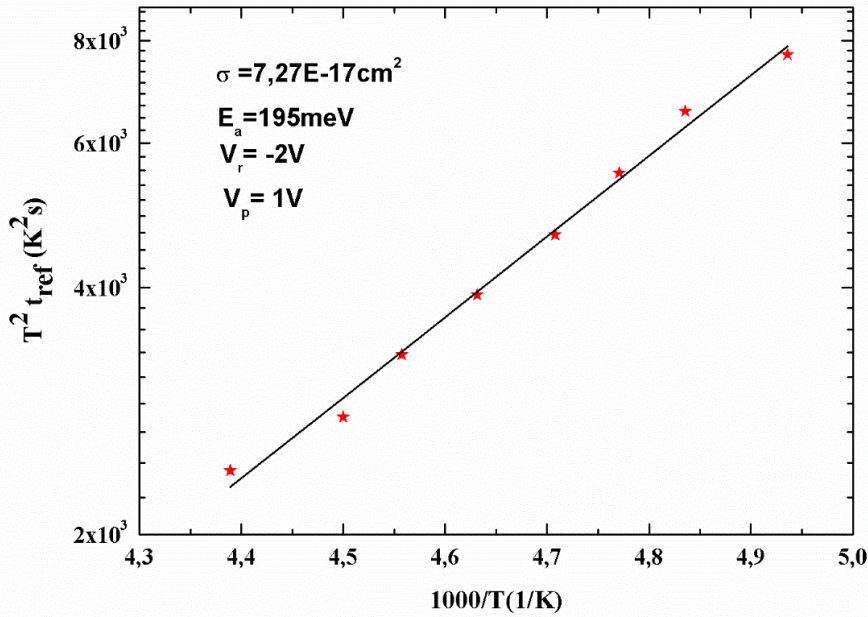
Şekil 8. ZnO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçları. Geri besleme voltajı (V_r) -2V ve darbe voltajı (V_p) 1V olarak uygulanmıştır. Zaman sabitinin (T_{ref}) 5 farklı değeri için elde edilen DLTS sinyalleri gösterilmektedir.

Şekil 9.'da AZO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçları grafiği verilmektedir.



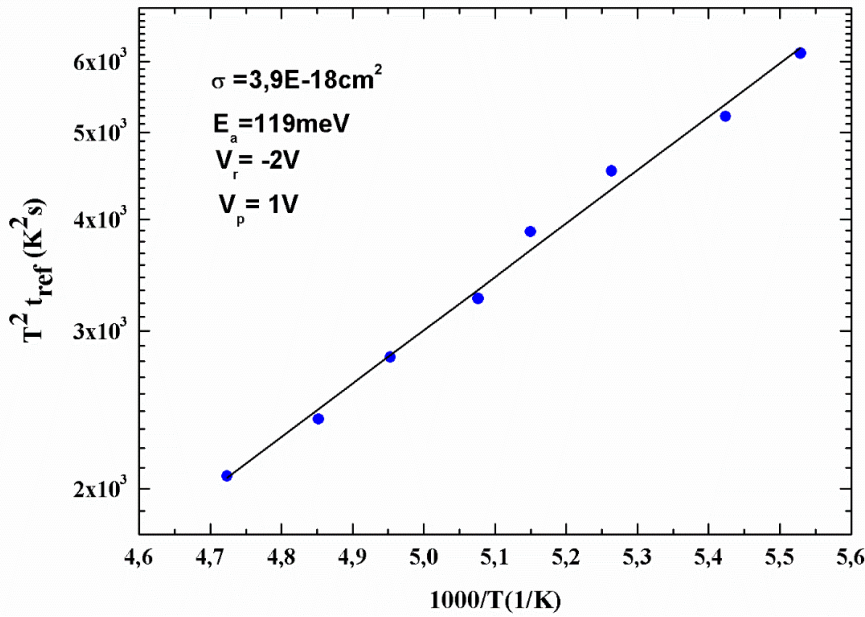
Şekil 9. AZO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçları. Geri besleme voltajı (V_r) -2V ve darbe voltajı (V_p) 1V olarak uygulanmıştır. Zaman sabitinin (T_{ref}) 5 farklı değeri için elde edilen DLTS sinyalleri gösterilmektedir.

Şekil 10'da ZnO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçlarından Denklem 2 kullanılarak elde edilen $T^2 t_{ref} - 1/T$ grafiği verilmektedir.



Şekil 10. ZnO/p-Si örneğinin $T^2 t_{ref} - 1/T$ grafiği. Denklem 2. kullanılarak ZnO ince filmi içerisindeki tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjisi (E_a) 195meV ve yakalama tesir kesiti (σ) $7.27 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur.

Şekil 11'de AZO/p-Si örneğinin DLTS ölçüm sonuçlarından Denklem 2. kullanılarak elde edilen $T^2 t_{ref} - 1/T$ grafiği verilmektedir.



Şekil 11. AZO/p-Si örneğinin $T^2 t_{ref}-1/T$ grafiği. Denklem 2. kullanılarak AZO ince filmi içerisindeki tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjisi (E_a) 119meV ve yakalama tesir kesiti (σ) $3,9 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur.

Buradan yapılarda bulunan derin tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjileri E_a , ZnO/p-Si örneği için 195meV ve AZO/p-Si örneği için 119meV olarak hesaplanmıştır. Tablo 1’de her iki örnek için elde edilen elektriksel parametreler verilmektedir.

Tablo 1. ZnO/p-Si ve AZO/p-Si örneklerinin elektriksel parametreleri

Örnek	V_{bi} (V)	N_a (cm^{-3})	N_a (cm^{-3})	E_a (meV)	σ (cm^2)
ZnO/p-Si	0.86	1.55×10^{16}	1.75×10^{15}	195	7.27×10^{-17}
AZO/p-Si	0.96	3.52×10^{16}	1.75×10^{15}	119	3.9×10^{-18}

4. Sonuç ve Yorum

I-V ölçüm sonuçlarından yapıların diyot karakteristiği gösterdiği anlaşılmaktadır. I-V ölçüm sonuçları $\pm 2V$ besleme voltajlarındaki akım değerleri kıyaslandığında her iki örneğinde en az 1000 kat doğrultma sağladığını göstermektedir. ZnO/p-Si örneğinin oda sıcaklığında sızıntı akımı değeri $10^{-6} A$ ve AZO/p-Si örneğinin oda sıcaklığında sızıntı akımı değeri $10^{-5} A$ mertebesinde olduğu bulunmuştur.

Oda sıcaklığında yapılan C-V ölçüm sonuçlarından ZnO/p-Si örneğinin taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Si altlığın taşıyıcı konsantrasyonu üreticinin verdiği öz direnç değerlerine ($5-10 \Omega \text{ cm}$) karşılık gelen $2.75 \times 10^{15}-1.35 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ aralığında, ortalama $1.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmıştır. ZnO için taşıyıcı konsantrasyonu $1.55 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç literatürde ZnO için verilen taşıyıcı konsantrasyonuna yakındır [21, 22]. AZO/p-Si örneğinin C-V sonuçlarından yapılan hesaplamalar, %2 oranında Al katkılamının ZnO yapısında taşıyıcı konsantrasyonunu artırdığını göstermektedir. AZO için taşıyıcı konsantrasyonu $3.52 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Literatürde büyütme ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak AZO için taşıyıcı konsantrasyonunun $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ’e kadar çıktığı raporlanmaktadır [21], [23]. ZnO/p-Si ve AZO/p-Si heteroeklemlerinin V_{bi} değerleri sırasıyla 0.86V ve 0.96V olarak bulunmuştur. Kontak potansiyeli (V_{bi}), ZnO ve Si iş

fonksiyonları arasında fark nedeniyle oluşur. ZnO için Fermi seviyesi (E_f) vakum seviyesinden 4.25eV aşağıda ve p-Si için Fermi seviyesi de vakum seviyesinden 4.97eV aşağıda olduğundan beklenen V_{bi} değeri 0.72eV'tur. Ancak deneysel sonuçlarda daha yüksek değerler raporlanmıştır [15, 24].

DLTS sonuçları her iki örnek içinde derin tuzak seviyelerinin varlığını göstermektedir. ZnO/p-Si örneğinin DLTS sonuçlarından elde edilen derin tuzakların aktivasyon enerjisi değeri $E_a=195$ meV olarak bulunmuştur. Bu değer literatürde yer alan ZnO yapı içerisinde iletkenlik bandından yaklaşık 195 meV aşağıda bulunan elektron seviyelerinin varlığını işaret etmektedir[17]. Tuzak seviyelerinin yakalama tesir kesiti $\sigma=7.27 \times 10^{17}$ cm² olarak bulunmuştur. ZnO yapısına %2 Al katkılanmanın yapının serbest elektron sayısını artırdığı ve direnci düşürdüğü bilinmektedir[21]. AZO/p-Si örneğinin DLTS sonuçlarından iletkenlik bandından 119 meV aşağıda elektron seviyelerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu seviyelerin yakalama tesir kesiti $\sigma=3.9 \times 10^{18}$ cm² olarak hesaplanmıştır.

ZnO/p-Si ve %2 Al katkılı AZO/p-Si heteroeklemlerinin elektriksel ölçümleri sonucunda her iki yapının diyot karakteristiği gösterdiği, her iki örnekte de elektron tuzaklarının var olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle AZO/p-Si heteroeklemi aygıt (güneş hücresi, detektör) yapımı için daha iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Ancak Al katkılanmayla heteroeklemin elektriksel özelliklerinde iyileşme sağlanmasına rağmen tuzak seviyelerinin varlığı yapılacak aygıtlarda performans kaybına neden olabilir.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: ONAP-52038.

Kaynakça

- [1] N. Akçay, G. Algün, N. Ü. Kılıç, S. Shawuti, and M. M. Can, "Europium dependent absorption properties of Zn_{1-(y+0.01)}(Al_{0.01}Eu_y)O (y = 0.00, 0.01, 0.03 and 0.05) thin films grown on the soda-lime glass substrates by spin coating," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 4492–4497, 2017.
- [2] N. Zebbar, Y. Kheireddine, K. Mokeddem, A. Hafdallah, M. Kechouane, and M. S. Aida, "Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 14, no. 3–4, pp. 229–234, 2011.
- [3] C. H. Chu, H. W. Wu, and J. L. Huang, "AZO/Au/AZO tri-layer thin films for the very low resistivity transparent electrode applications," *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 186, no. 1, pp. 117–121, 2014.
- [4] Y. Liu, Y. Li, and H. Zeng, "ZnO-based transparent conductive thin films: Doping, performance, and processing," *J. Nanomater.*, vol. 2013, no. Cvd, 2013.
- [5] L. Zhu and W. Zeng, "Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 267, pp. 242–261, 2017.
- [6] R. Ghosh and D. Basak, "Electrical and ultraviolet photoresponse properties of quasisaligned ZnO nanowires/ p-Si heterojunction," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 24, pp. 2005–2008, 2007.
- [7] X. Zong and R. Zhu, "Zinc oxide nanorod field effect transistor for long-time cellular force measurement," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. October 2016, pp. 1–8, 2017.
- [8] G. Algün, "Humidity sensing properties of fluorine doped zinc oxide thin films," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 29, no. 19, pp. 17039–17046, 2018.
- [9] N. Üzar, G. Algün, N. Akçay, D. Akcan, and L. Arda, "Structural, optical, electrical and humidity sensing properties of (Y/Al) co-doped ZnO thin films," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 16, 2017.
- [10] R. Pietruszka, B. S. Witkowski, E. Zielony, K. Gwozdz, E. Placzek-Popko, and M. Godlewski, "ZnO/Si heterojunction solar cell fabricated by atomic layer deposition and hydrothermal methods," *Sol. Energy*, 2017.

- [11] D. C. Look, G. M. Renlund, R. H. Burgener, and J. R. Sizelove, "As-doped p-type ZnO produced by an evaporation/sputtering process," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 22, pp. 5269–5271, 2004.
- [12] G. Brauer, J. Kuriplach, C. C. Ling, and A. B. Djurišić, "Activities towards p-type doping of ZnO," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 265, no. 1, 2011.
- [13] F. Yakuphanoglu, Y. Caglar, M. Caglar, and S. Ilican, "ZnO/p-Si heterojunction photodiode by solgel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 13, no. 3, pp. 137–140, 2010.
- [14] X. Wang *et al.*, "ZnO thin film grown on silicon by metal-organic chemical vapor deposition," *J. Cryst. Growth*, vol. 243, no. 1, pp. 13–18, 2002.
- [15] Y. S. Ocak, "Electrical characterization of DC sputtered ZnO/p-Si heterojunction," *J. Alloys Compd.*, vol. 513, pp. 130–134, 2012.
- [16] A. A. Ibrahim and A. Ashour, "ZnO/Si solar cell fabricated by spray pyrolysis technique," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2006.
- [17] K. Gwozdz *et al.*, "Deep traps in the ZnO nanorods/Si solar cells," *J. Alloys Compd.*, vol. 708, pp. 247–254, 2017.
- [18] T. Hanada, "Basic Properties of ZnO, GaN, and Related Materials," in *Oxide and Nitride Semiconductors*, T. Yao and S.-K. Hong, Eds. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 1–19.
- [19] W. C. Dunlap and R. L. Watters, "Direct measurement of the dielectric constants of silicon and germanium," *Phys. Rev.*, vol. 92, no. 6, pp. 1396–1397, 1953.
- [20] D. V. Lang, "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 7, pp. 3023–3032, 1974.
- [21] M. U. Shahid, K. M. Deen, A. Ahmad, M. A. Akram, M. Aslam, and W. Akhtar, "Formation of Al-doped ZnO thin films on glass by sol-gel process and characterization," *Appl. Nanosci.*, vol. 6, no. 2, pp. 235–241, 2016.
- [22] C. E. Stutz, "Electrochemical Schottky characteristics of ZnO for capacitance-voltage measurements," *J. Electron. Mater.*, vol. 30, no. 12, pp. 2–4, 2001.
- [23] J.-C. Lin, M.-C. Huang, T. Wang, J.-N. Wu, Y.-T. Tseng, and K.-C. Peng, "Structure and characterization of the sputtered ZnO, Al-doped ZnO, Ti-doped ZnO and Ti, Al-co-doped ZnO thin films," *Mater. Express*, vol. 5, no. 2, pp. 153–158, 2015.
- [24] A. Kaphle and P. Hari, "Characterization of Aluminum Doped Nanostructured ZnO/p-Si Heterojunctions," *Int. J. Eng. Sci.*, pp. 2319–1813, 2016.

Namık AKÇAY, akcay@istanbul.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1660-213X>