

Zn TABANLI HETEROEKLEMLERİN KAPASİTANS-VOLTAJ KARAKTERİZASYONU

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Aydın YILDIRIMLAR

Danışman: Doç. Dr. Tayyar GÜNGÖR

Mayıs, 2014

BURDUR



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Aydın YILDIRIMLAR tarafından Doç. Dr. Tayyar GÜNGÖR yönetiminde hazırlanan “Zn TABANLI HETEROEKLEMLERİN KAPASİTANS-VOLTAJ KARAKTERİZASYONU” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi 30/05/2014

Prof. Dr. Bülent ULUĞ
Akdeniz Üniversitesi

Başkan

Doç. Dr. Tayyar GÜNGÖR
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Ebru GÜNGÖR
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Melike B. YÜCEL
Akdeniz Üniversitesi
Jüri Üyesi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Jüri Üyesi

ONAY

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun tarih ve Sayılı kararı ile kabul edilmiştir

Doç. Dr. Songül ŞEN GÜR SOY

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	5
2.1. Yarıiletkenler	5
2.2. Homoeklemler	7
2.3. Heteroeklemler	9
2.4. n-ZnO/p-Si Heteroeklemler	12
2.5. Metal Yarıiletken Eklemler	14
2.5.1. p-n Eklem Diyotların Akım - Voltaj Karakteristiği	14
2.5.2. p-n Eklem Diyotların Kapasitans - Voltaj Karakteristiği	17
2.6. Saydam İletken Oksit (SİO) Malzemeler	19
2.6.1. Çinko Oksit (ZnO)	21
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. Cam Alttaş Hazırlama	24
3.2. Si Alttaş Hazırlama	24
3.3. Sprey Çözeltisi Hazırlama	25
3.4. Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) Sistemi	25
3.4.1. ZnO İnce Film Oluşma Süreci	27

3.4.2. n-ZnO/p-Si Heteroeklem Eldesi	27
3.5. İnce Filmlerin Optik Sabitlerinin Belirlenmesi	28
3.5.1. Spektrofotometrik (UV-Vis) Ölçümler	28
3.5.2. Optik Sabitlerin Belirlenmesi	30
3.5.3. Optik Band Aralığı (E_g)	30
3.6. İnce Filmlerin Yapısal İncelenmesi	33
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	36
4.1. ZnO İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi	36
4.2. ZnO İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi	38
4.3. n-ZnO/ p-Si Eklemlerin Akım-Voltaj Karakterizasyonu	41
4.3.1. 0,04 M n-ZnO/p-Si Analizi	42
4.3.2. 0,08 M n-ZnO/p-Si Analizi	46
4.3.3. 0,1 M n-ZnO/p-Si Analizi	51
4.4. n-ZnO/p-Si Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakterizasyonu	56
4.5. n-ZnO/p-Si Heteroeklemin Kapasitans-Frekans (C-f) Belirtkenleri	60
5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	67
6. KAYNAKLAR	69
EK 1	72
ÖZGEÇMİŞ	75

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Zn TABANLI HETEROEKLEMLERİN KAPASİTANS-VOLTAJ KARAKTERİZASYONU

Aydın YILDIRIMLAR
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Bu tez çalışmasında, Ultrasonik Kimyasal Püskürtme Tekniği (UKP) kullanılarak p-tipi Si (100) alttaş üzerine n-tipi ZnO biriktirilerek elde edilen n-ZnO/p-Si heteroeklemlerin akım-voltaj ($I-V$) ve kapasite-voltaj ($C-V$) karakterizasyonları yapılmıştır. n-tipi ZnO elde etmek için Zn kaynağı olarak metanol içinde çözülmüş çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$, ZAD) tuzu kullanılmıştır. ZAD miktarına bağlı olarak 0,04 M – 0,08 M ve 0,1 M başlangıç çözeltileri, 400 °C sabit sıcaklıktaki p-tipi Si alttaşlar üzerine taşıyıcı gaz olan hava yardımı ile gönderilmiştir. n-ZnO ince filmlerin film kalınlıkları ve optik band aralıkları gibi optik sabitleri optik geçirgenlik spektrumları kullanılarak belirlenmiştir.

Eklemlerin ileri besleme durumunda akım-voltaj karakterizasyonu ile idealite faktörü belirlenmiştir. 0,04 M ve 0,08 M ZAD içeren eklemler için düşük voltaj değerlerinde idealite faktörü 2 civarında iken 0,1 M ZAD içeren örnek için bu değerden daha yüksek değerler gözlenmiştir. Bütün örnekler için $C-V$ ölçümlerinde artan frekans ile kapasitans değerlerinde azalma gözlenmiştir. Ters besleme voltajı altında $C-f$ değişimleri dikkate alındığında, düşük frekanslarda (1 kHz) gözlenen tepe noktası, artan frekans ile (10 kHz) düşük voltaj değerlerine kaymaktadır. Ancak, beklendiği gibi frekans arttıkça örneklerin kapasitans değerlerindeki değişim azalmakta ve $C-V$ değişiminde pik gözlenmemektedir. Bununla beraber artan ZAD miktarı ile $C-f$ spekturumunda gözlenen tepe noktası daha düşük ters voltaj değerlerine doğru hareket etmektedir. Sıcaklığa bağlı $C-V$ değişimleri incelendiğinde ise düşük sıcaklıklarda (~200 K), voltajdan bağımsız sabit olan C değerleri, sıcaklık artışı ile artmakta ve iki eğimli doğrusal davranış sergilemektedir.

Çalışmada başlangıç çözelti konsantrasyonunun, heteroeklemin elektiriksel özelliklerine etkisi de incelenmiştir. Çözelti konsantrasyonları değiştirilerek, daha geniş bir aralığın taranması ve farklı elektiriksel kontakların eklemin elektiriksel karakteristiğine etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir.

Anahtar Kelimeler: Saydam iletken Oksit, Çinko Oksit, Ultrasonik Kimyasal Püskürtme Tekniği, Heteroeklem, $C-V$ Karakterizasyonu

Danışman: Doç. Dr. Tayyar GÜNGÖR, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Hazırlanan bu Yüksek Lisans Tezi Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: 0156 YL 12, 173-NAP-13 ve 110-NAP-10).

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERIZATION of Zn BASED HETEROJUNCTIONS

Aydın YILDIRIMLAR
Mehmet Akif Ersoy University
Institute of Science and Technology
Department of Physics

In this thesis, the current-voltage (I - V) and capacitance-voltage (C - V) characterization of n-ZnO/p-Si heterojunctions formed with n-ZnO and p-Si (100) substrates by using Ultrasonic Spray Pyrolysis Technique (USP) were carried out. In order to obtain n-ZnO thin films, zinc-acetate dihydrate ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ZAD) dissolved in methanol was used as a source of zinc. The precursor solutions with different molarities such as 0.04 M, 0.08 M and 0.1 M were sprayed onto the p-Si substrate held at 400 °C. Compressed air was used as the carrier gas. The thicknesses of n-ZnO thin films, optical band gap and other optical constants were determined by means of optical transmission spectra.

The ideality factors were determined from the forward-biased characteristic of the heterojunctions. The ideality factor of heterojunctions containing 0.04 M and 0.08 M ZAD were found to be approximately 2 at low voltage regime. However, the ideality factor of heterojunction containing 0.1 M ZAD is higher than the other heterojunctions. Considering C - V measurement, capacitance values are decreased with increasing frequency for the all of the samples. Under reverse bias, the peak observed in the C - f spectrum at low frequency such as 1 kHz shifted to low voltage with increasing frequency. However, as expected, the capacity change of the samples decreases with increasing frequency and the peak observed in the spectrum is disappeared. When the amount of zinc increased in the precursor solution, the peak observed in C - f spectrum is moving towards to the lower reverse voltage value. Taking into account of temperature dependent C - V measurements, the capacitance value is independent of reverse bias voltage and it seems to be constant at low temperatures (~ 200 K). However, C values increase with increasing temperature and exhibit a linear behavior that is having two slope.

In this study, the effects of starting solution onto the electrical properties of the heterojunction were also examined. However, how the concentration and electrical contact materials are effecting electrical properties of the heterojunction should be investigated for the different values of starting solution molarity.

Keywords : Transparent Conductive Oxide, Zinc Oxide, Ultrasonic Spray Pyrolysis Technique , Heterojunction, *C-V* Charaterization

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tayyar GÜNGÖR, Mehmet Akif Ersoy University, Graduate School of Naturel and Applied Sciences, Department of Physics

The present M.Sc. thesis was supported by Mehmet Akif Ersoy University under the project number 0156 YL 12, 173-NAP-13 and 110-NAP-10.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım kapsamında gerek kurumsal gerek deneysel ortam hazırlanmasında göstermiş oldukları özverili katkılarından dolayı ve çalışmam sırasında büyük yardımlarını gördüğüm, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, çalışmanın her safhasında maddi ve manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Tayyar GÜNGÖR'e ve Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Ebru GÜNGÖR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansım boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÇİÇEK'e teşekkür ederim.

Bilkent Üniversitesi Nano Teknoloji Araştırma Merkezinde Araştırma Mühendisi olarak görev yapan Fizik Yüksek Müh. M. Deniz ÇALIŞKAN'a fotoşıl spektrumlarının elde edilmesindeki katkılarından dolayı teşekkür ederim. ZnO ince filmlerin X-ışını kırınım desenlerinin elde edilmesindeki katkılarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Abdullah CEYLAN'a teşekkür ederiz.

Tez çalışması için gerekli altyapı imkânlarının sağlanmasında katkılarından dolayı Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunu'na teşekkür ederim (Proje No: 0156 YL 12, 173-NAP-13 ve 110-NAP-10).

Yaşantımın her döneminde bana her türlü desteği sağlayan aileme, annem Neriman YILDIRIMLAR'a babam Ahmet YILDIRIMLAR'a, ablalarım; Zeliha AKKURT, Ayla YILDIRIMLAR ve Duygu AKÇAY'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Aydın YILDIRIMLAR
Burdur, 2014

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Malzemelerin enerji-band aralıklarına göre sınıflandırılması (URL 1).....	5
Şekil 2.2. (a) Silikon elementinin atom yapısı, (b) n-tipi Si (fosfor (P) katkılı), ve (c) p-tipi Si (boron (B) katkılı) (Sze ve Kwok, 2007)	7
Şekil 2.3. (a) Silikondan n ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşmeden ve, (b) değişikliklerle sonraki enerji-band grafikleri (Sarı, 2009)	8
Şekil 2.4. n-tipi Si ile p-tipi Ge yarıiletkenin eklem oluşmadan önceki (a) ve sonraki (b) enerji-band diyagramları (Sarı, 2009).....	9
Şekil 2.5. Heteroeklemlerin enerji-band diyagramlarına göre sınıflandırma	10
Şekil 2.6. n-ZnO /p-Si heteroeklemin sıfır belsem durumunda enerji-band diyagramı	11
Şekil 2.7. Alttaş olarak kullanılan p-tipi (100) Si için katkı atom konsantrasyonunun öz direnç ile değişimi (URL 2)	12
Şekil 2.8. n-ZnO /p-Si heteroeklemin ısı dengedeki enerji band grafiği (Ali, 2008).....	13
Şekil 2.9. (a) Metal/ n-tipi yarıiletken eklemine birleşmeden önce, (b) birleşmeden sonraki enerji-band diyagramları (Sze ve Kwok, 2007)	14
Şekil 2.10. p-n eklemin yarı logaritmik akım-voltaj değişimi (Ali, 2008).....	17
Şekil 2.11. SiO malzemelerin değişik kullanım alanlarına örnekler	19
Şekil 2.12. ZnO için dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik spektrum (R:Yansıtma, R:Geçirgenlik A:Absorbans) (Ginley ve diğ., 2010)	20
Şekil 2.13. ZnO yarıiletkeninin Wurtzite kristal yapı modeli (Wang, 2009).....	21
Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan UKP sisteminin blok diyagramı (a) ve çalışmanın gerçekleştirildiği UKP sisteminin fotoğrafı (b)	26
Şekil 3.2. 0,1 M, 0,08 M ve 0,04 M başlangıç çözelti molaritesi kullanılarak üretilen üç adet n- ZnO/p-Si heteroeklem.....	28
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan PG Instrument T-70 model UV-VIS Spektrofotometre.....	29
Şekil 3.4. Doğrudan (a), ve dolaylı band aralığına (b) sahip katıların enerji-band diyagramı.....	31
Şekil 3.5. Doğrudan ve dolaylı band aralığına sahip malzemeler için optik band aralığının sırası ile 2,42 eV ve 2,36 eV olarak belirlendiği Tauc ve Cody çizimleri	32
Şekil 3.6. Kritik dalgaboyu yöntemi ile optik band aralığının belirlenmesi (Dolbec ve diğ., 2002).....	33
Şekil 4.1. Farklı ön çözelti akış hızları için hazırlanan ZnO ince film örneklerinin X-ışını kırınım desenleri.....	37
Şekil 4.2. Z6 olarak adlandırılan ZnO ince film ait PL spektrumu	38
Şekil 4.3. Z6 örneğinin $T''(\lambda)$ değişimi ve optik band aralığının hesaplanması	39

Şekil 4.4. Farklı ön çözelti akış hızları için elde edilen optik geçirgenlik spektrumları	40
Şekil 4.5. Z6 numaralı örneğe ait optik geçirgenlik ve yansıma spektrumu	40
Şekil 4.6. Z6 numaralı örneğe ait hesaplanan ve deneysel optik geçirgenlik spektrumu	41
Şekil 4.7. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için $I-V$ değişimi	42
Şekil 4.8. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için $\ln(I)-V$ değişimi ve idealite faktörünün belirlendiği $\ln(I)-V$ değişimi	43
Şekil 4.9. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için Eşitlik (2.10) ile uyum içindeki $I-V$ değişimi	43
Şekil 4.10. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için frekansa bağlı kapasite değişimi	44
Şekil 4.11. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için ters voltaj altında frekansa bağlı kapasitans değişimi 1 kHz (a), 10 kHz (b), 100 kHz (c) ve 1000 kHz (d)	45
Şekil 4.12. Ters voltaj altında frekansa bağlı kapasite değişimi	46
Şekil 4.13. 0,08 M n-ZnO/p-Si örnek için $I-V$ değişimi	47
Şekil 4.14. 0,08 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için $\ln(I)-V$ değişimi ve idealite faktörünün belirlendiği $\ln(I)-V$ değişimi	47
Şekil 4.15. 0,08 M n-ZnO/p-Si için frekansa bağlı kapasite değişimi	48
Şekil 4.16. Ters voltaj altında frekansa bağlı kapasite değişimi 1 kHz (a), 10 kHz (b), 100 kHz (c) ve 1000 kHz (d)	50
Şekil 4.17. Ters voltaj altında 0,08 M n-ZnO/p-Si örneğin frekansa bağlı kapasite değişimi	51
Şekil 4.18. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı $I-V$ değişimi	52
Şekil 4.19. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı $I-V$ değişimi V_{bi} değerlerinin gösterimi	52
Şekil 4.20. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için $\ln(I)-V$ grafiğinin sıcaklığa göre değişimi	53
Şekil 4.21. 0,1 M n-ZnO/p-Si $\log(I)-\log(V)$ değişimi	54
Şekil 4.22. K1 heteroekleminin sıcaklığa bağlı karanlık $I-V$ değişimi	55
Şekil 4.23. K1 heteroekleminin $\ln(I)-V$ değişimi	56
Şekil 4.24. n-ZnO/p-Si heteroeklem (K1) için sıcaklığa bağlı $C-V$ değişimi	57
Şekil 4.25. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklem sıcaklığa bağlı $C-V$ değişimi	58
Şekil 4.26. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklem sıcaklığa bağlı I/C^2-V değişimi	59
Şekil 4.27. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklem için ters besleme voltajı ile kapasite değişimi	59
Şekil 4.28. 0,1 M ZAD içeren K1 ve tezde kullanılan heteroeklem için $C-f$ değişimi (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz ve 1 MHz)	60
Şekil 4.29. 0,1 M ZAD içeren tezde üretilen heteroeklem için sıcaklığa bağlı $C-f$ değişimi	61
Şekil 4.30. 0,1 M n-ZnO/p-Si için frekansa bağlı $C-T$ değişimi	62
Şekil 4.31. K1 eklem sıcaklığa bağlı kapasite ($C-T$) değişimi	62
Şekil 4.32. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı kapasite ($C-T$) değişimi	63
Şekil 4.33. Sıcaklığa bağlı kapasitans-frekans değişimi	64
Şekil 4.34. Yüksek frekans ve düşük frekans için sıcaklığa bağlı kapasite değişimi	65

Şekil 4.35. Heteroeklemlerin ara yüzey durum yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi.....	65
Şekil 4.36. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklemin 500 kHz frekans değeri için voltaj-kapasitans değişimi.....	66
Şekil E.1. C-V ölçüm sistemi şematik gösterimi	72
Şekil E.2. C-V, I-V ölçüm sistemi şematik gösterimi	72
Şekil E.3. C-V ölçümünde kullanılan LabVIEW programın görünümü	73
Şekil E.4. Ters beslemede 1N4001 diyotunun Kapasitans-Voltaj değişimi.....	73
Şekil E.5. 1N4001 için $1/C^2-V_a$ değişimi	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı elementsel, bileşik ve alaşım formundaki yarıiletkenler (Mutlu, 2010)	6
Çizelge 2.2. ZnO'nun fiziksel özellikleri	22
Çizelge 2.3. II ve VI grup elementlerinin bazı ikili, üçlü ve dörtlü bileşikleri.....	23
Çizelge 3.1. Farklı ön çözelti akış hızları için film kalınlıkları, film biriktirme hızı ve grain boyutları	27
Çizelge 3.2. Hegzagonal-Wurtzite yapıdaki ZnO, X-ışını kırınım desenleri ve eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanan d değerleri	35
Çizelge 4.1. PUMA yardımı ile hesaplanan film kalınlıkları ve kristallinite (grain) boyutları.	37
Çizelge 4.2. 0,04 M n-ZnO/p-Si örnek için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden sabit ve eğim, R ise korelasyon sabiti	44
Çizelge 4.3. 0,08 M n-ZnO/p-Si örnek için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden parametreler ($y=Ax+B$), R ise korelasyon sabiti	48
Çizelge 4.4. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden sabit ve eğim, R ise korelasyon sabiti	53
Çizelge 4.5. K1 heteroeklemi için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden parametreler ($y=Ax+B$), R ise korelasyon sabiti.....	56
Çizelge E.1. Doğrusal davranış için hesaplanan uyum parametreleri ($R=-0,99944$ ve standart sapma, $SD=0,00288$).....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

β	X-ışını kırınım desenindeki piklerin yarı maksimum genişliği
ϵ	Dielektrik katsayısı
ρ	Özdirenç
θ_B	Bragg yansıma açısı
C	Kapasitans
d	Tükenme bölgesi kalınlığı
e	Elektronun yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
E_C	İletkenlik bandının enerji seviyesi
E_F	Fermi enerji
E_g	Enerji bandı
E_v	Değerlilik bandının enerji seviyesi
f	Frekans
I	Akım
IR	Kırmızı-Altı
I_s	Saturasyon akımı
k	Boltzman sabiti
LED	Işık yayan diyot
M	Molar
N	Katkı atom yoğunluğu
$n(\lambda)$	Dalga boyuna bağlı filmin kırma indisi
N_1, N_2	Katkı yoğunlukları

N_A	Alıcı atom konsantrasyonu ($1,6 \times 10^{17} \text{ 1/cm}^3$)
nm	Nanometre
PUMA	Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm
q	Elektriksel yük
R	Korelasyon sabiti
R_s	Seri direnç
SCLC	Uzay-Yüküyle sınırlı akım (space-charge limited current)
t	Filmin kalınlığı
T	Mutlak sıcaklık
UKP	Ultrasonik Kimyasal Püskürtme
UV	Morötesi
UV-VIS	Morötesi-Görünür bölge
V	Voltaj
V_a	Uygulanan voltaj
V_{bi}	Built-in potansiyel
$\alpha(\lambda)$	Dalga boyuna bağlı optik soğurma katsayısı
η	İdealite faktörü
λ	Dalgaboyu
μ_p	Deşiklerin mobilitesi
χ	Elektron ilgisi

1. GİRİŞ

1947 yılında transistörün keşfi, 20. yüzyılın en önemli buluşlarından biri olarak kabul edilebilir. Bu keşif 1956 yılında, Nobel ödülü ile değerlendirilmiştir. İlk transistör için germanyum yarıiletkeni kullanılırken 1957 yılından sonra çok daha büyük sıcaklıklara dayanabilen silikon yarıiletkeni kullanılmaya başlandı. Bu nedenle günümüzde kullanılan yarıiletken teknolojisi silikon teknolojisi olarak isimlendirilmiştir. Yarıiletken endüstrisinde kullanılan silikon çok yüksek saflık değerine (%99.999999) sahip olmasına rağmen uygun elementler ile katkılanabilir. Periyodik cetvelde III. sütun elementleri ile katkılandığında p-tipi, V. sütun elementleri ile katkılandığında ise n-tipi yarıiletkenler olarak isimlendirilen yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri, elektron ve deşik (hole) konsantrasyonları ile değiştirilebilir. p-tipi ve n-tipi katkılı yarıiletkenler ile eklem yapılar oluşturmak mümkün olmaktadır. Aynı elementin p-tipi ve n-tipi katkılanmış biçimlerinin bir araya gelmesiyle oluşan eklem türüne homoeklem (homojunction), farklı türlerde elementler içeren eklem ise heteroeklem (heterojunction) adı verilir.

Eklem yapıları en basit örnek p-n eklem şeklinde iki kutuplu (bipolar) konfigürasyona sahip diyot, direncin aksine doğrusal olmayan akım-voltaj davranışı sergiler. Işık yayan diyotlardan (Light Emitting Diode, LED), lazer diyotlara, güneş pillerinden, fotodedektörlere kadar çok değişik kullanım alanları bulunmaktadır. Ayrıca uygun kombinasyonlar ile transistör (pnp, npn) olarak da görev yaparlar. Bununla beraber, kusur “defect” aslında kristal yapıdan olan sapmalar olarak isimlendirilebilir. Öyle ki, örgünün periyodikliğinin bir kusur nedeni ile bozulması yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı içerisinde verici veya alıcı tipi safsızlık atomlarının neden olduğu derin seviye enerji düzeylerinin oluşmasına neden olur. Periyodiklikte gözlenen kısa mesafeli bozukluklar derin seviyelerden, uzun bozukluklar ise sığ seviyelerden kaynaklanmaktadır. Yarıiletkenlerdeki derin seviyeler, sıcaklığa ve katkı konsantrasyonuna göre tuzak ya da yeniden birleşme merkezi olarak rol oynarlar. Yarıiletkenler ve yalıtkanlarda yapısal bozukluklardan kaynaklanan kusurlar ve katkı atomları kullanılarak elektronik aygıtların performansları kontrol edilebilir. Öyle ki bazı durumlarda, üretim sürecinde katkılama ile derin enerji seviyeleri bilerek oluşturulur.

Sığ tuzakların karakterizasyonu için safsızlık atom konsantrasyonu ve enerji seviyeleri hakkında hem elektriksel hem de optik yöntemler kullanılabilir. Bununla beraber, derin seviye tuzaklar için tuzaklanan yüklerin dikkate alındığı kapasitans-voltaj ($C-V$), akım-zaman ($I-t$), yük-zaman ($Q-t$) veya kapasitans-zaman ($C-t$) ölçümlerini içeren yöntemler kullanılır.

Teknolojik gelişmelere öncülük eden malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyonu bilimsel araştırmaların en temel noktalarından biridir. Bu bakış açısı ile çok değişik yöntemlerin varlığı ve bunların farklı türdeki malzemeler üzerinde uygulanabilir olması araştırmalara bir kısıtlama getirmemektedir. Yarıiletken teknolojisi şu ana kadar silikon ve germanyum elementleri üzerine kurulmuş gibi gözükse de araştırmacılar sürekli olarak hem p-tipi hem de n-tipi özellik gösterebilecek daha ucuz, kullanımı kolay ve doğada fazlaca bulunabilen sağlık açısından zararlı etkileri olmayan ve performansı daha yüksek başka yarıiletkenlere aramaktadır.

Son zamanlarda birçok araştırmaya konu olan n-ZnO ile kristal silikonun bir araya gelmesi ile eklem türünde aygıtlar geliştirilmiştir. Bu sayede silikon bağımlılığını bir ölçüde azaltmaya yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. İlk etapta p-ZnO eldesi konusunda karşılaşılan zorluklar nedeni ile farklı teknikler ile hazırlanan n-ZnO içeren aygıt performansları üzerinde araştırmalar sürmektedir.

Karataş ve Altındal (2004) hazırladıkları n-ZnO/p-Si Schottky diyodu için temel fiziksel parametreleri $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri yöntemlerini kullanılarak hesaplanmışlar. Seri direnç değerlerinin çok büyük ve ara yüzey durumları yeterince yüksek ise $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri ideal durumdan sapacağını belirtmişler. Bunu gidermek için farklı bir hesaplama yöntemi (Norde, 1979) kullanmışlardır. Bulunan sonuçları karşılaştırdıklarında paralellik gösterdiğini vurgulamışlardır.

Chaabouni ve diğ. (2006) RF sputtering yöntemi ile oluşturdukları n-ZnO/p-Si heteroeklemin $I-V$ ve $C-V$ karakterizasyonu yapılmışlar. Hesapladıkları bariyer yüksekliğinin hem $1/C^2-V$ karakterizasyonuna göre hem de $I-V$ karakterizasyonunu karanlık koşullarının 0,7 eV olduğunu belirlemişlerdir.

Mridha ve diğ. (2009) farklı ZnO ince film kalınlıklarında sol jel tekniği ile üretilen n-ZnO/p-Si heteroeklemin karanlıkta ve aydınlıkta $C-V$ karakterizasyonları incelemiştir. 0,46 μm kalınlıkta ZnO içeren heteroeklemin iyi bir diyot özelliği gösterdiğini; +5 V besleme voltajı için ileri akım ve ters besleme akım oranını

(I_F/I_R) $5,7 \times 10^3$, kaçak akım yoğunluğunu (J_R) -5 V ters besleme voltaj değeri için $7,6 \times 10^{-5} \text{ Acm}^{-2}$ ve idealite faktörünün de 4,15 olarak hesapladıklarını rapor etmişlerdir.

Yakuphanoğlu ve diğ. (2010) Sol-Gel spin kaplama metodu ile yaptıkları nano yapıdaki n-ZnO/p-Si heteroeklem idealite faktörünü 3,18 ve bariyer yüksekliğini de 0,78 eV olarak hesaplamışlardır. Nano yapıdan ürettikleri eklem performansında önemli bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Zebbar ve diğ. (2011) ultrasonik kimyasal püskürtme yöntemi ile p-Si üzerine n-ZnO biriktirerek n-ZnO/p-Si heteroeklem oluşturmuşlardır. Diğer parametreleri sabit kalması koşulu ile alttaş sıcaklığınının (250 °C'den 400 °C'ye 50 °C adımlarla değiştirerek) heteroeklemin yapısal ve optik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Heteroeklemin $I-V-T$ ve $C-V-T$ karakterizasyonları ile saturasyon akımının aktivasyon enerjisi yaklaşık $0,14$ eV ve oda sıcaklığındaki built-in potansiyel değeri $1,14$ V olarak hesaplamışlardır.

Al-Heniti ve diğerleri (2011) n-ZnO/p-Si nano tel heteroeklem aygıtın elektriksel özelliklerini incelemişler. Heteroeklemin bariyer yüksekliğinin sıcaklık ile arttığı, aktivasyon enerjisinin 53 meV olduğunu söylemişlerdir. n-ZnO/p-Si heteroeklemin bariyer yüksekliği $0,68$ eV olarak hesaplamışlardır.

Aksoy ve Cağlar (2012), sol-jel metodu kullanarak elde ettikleri nano yapıdaki n-ZnO/p-Si heteroeklemler de ideal kontak davranışı gözleyemediklerinin ve 296 K'de hesaplanan idealite faktörünün de yüksek bir değer olduğunu ($6,40$) bildirmişlerdir.

Ocak (2012) tarafından Saçtırma yöntemi (Sputtering) ile p-Si üzerine n-ZnO biriktirerek elde ettiği heteroeklemlerde alüminyum kontaklarla $I-V$, $C-V$ ve $C-f$ ölçümlerini aydınlık ve karanlık ortamlarda yapmışlar. Aygıtlarının doğrultucu davranış sergilediği ve idealite faktörünü $1,35$, engel yüksekliğini $0,76$ eV, seri direncinin $6,69$ k Ω ve enerji-band aralığının da $3,28$ eV olarak hesaplanmıştır.

Baydoğan ve diğ. (2013) ZnO yerine Sol-Gel yöntemi ile alüminyum katkılı ZnO:Al ve p-Si kullanarak heteroeklem elde etmişlerdir. Oluşturdukları heteroeklemi $C-V$ ölçümleri yapmışlar. Ölçümlerin sonucunda keskin bir eklem olduğunu gözlemişlerdir.

Mondal ve diğ. (2013) kimyasal daldırma yöntemi ile oluşturdukları n-ZnO/p-Si heteroeklem yapısının, $I-V$ ölçümleri için n-ZnO üzerine Ag ile p-Si üzerine Al ile kontaklar almışlar. $I-V$ karakterizasyonu sonucunda doğrultucu davranış gözlemişler.

Sharma ve Periasamy (2014) n-ZnO/p-Si heteroeklem fotodetektör olarak kullanmışlardır. Özellikle ZnO film kalınlığı ve katkı yoğunluğunun fonksiyonu detektörün karanlık akım ve duyarlılıklarını incelemişlerdir. Buna göre, fotodetektörün duyarlılığının ZnO film kalınlığı ile arttığını, artan donör ve akseptör katkı konsantrasyonunu ile azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca heteroeklemin karanlık ortamdaki akımının 10^{-14} olduğunu rapor etmişlerdir.

Yukarıda verilen çalışmalar ve elde edilen sonuçların çeşitliliği göz önüne alındığında benzer yapıda farklı teknikler ile hazırlanan heteroeklemlerin karakteristiklerinde de farklılıklar gözlenmiştir. Bilimsel olarak bu farklılıkları araştırmak ve var olan belirsizlikleri ortadan kaldırmak için katkı sağlamak amacı ile benzer yapıdaki heteroeklemlerin eldesi ve karakterizasyonu bu tez çalışmasının esas konusu olarak seçilmiştir.

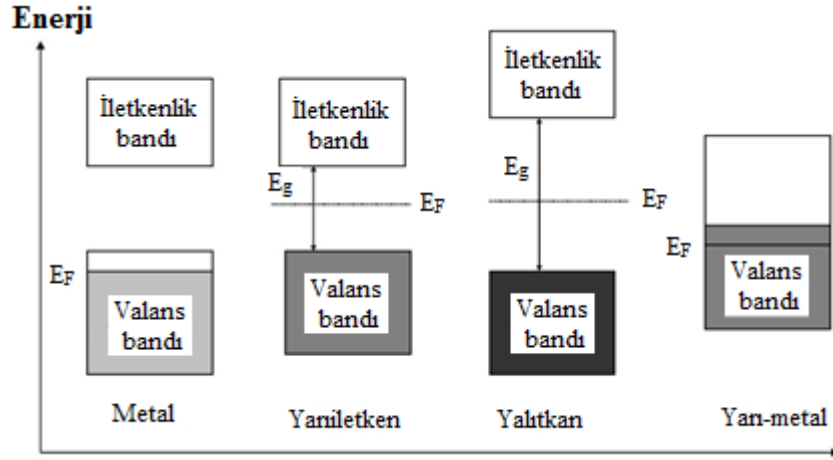
Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde yarıiletkenler ile yarıiletken eklemlerin (homoeklem ve heteroeklem) yapısal ve elektriksel özellikleri ve saydam iletken oksit ailesinin bir üyesi olan ZnO hakkında bilgiler verilmektedir. Zira, ZnO hala güncelliğini korumaktadır. Literatürde son on yılda farklı yöntemler kullanılarak hazırlanan ZnO ile ilgili veya ZnO içeren 5000'den fazla bilimsel çalışma rapor edilmiştir. Üçüncü bölümde, üretim yöntemlerinden biri olan Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) sistemi ve uygun başlangıç malzemesi kullanılarak elde edilen n-ZnO ince filmler ve sonrasında da p-Si (100) alttaş üzerine n-ZnO ince filmin biriktirilmesiyle elde edilen n-ZnO/p-Si heteroeklem aygıt elde edilmesi hakkında bilgiler verilmektedir. Dördüncü bölümde ise ZnO ince filmlerin karakterizasyonu ve n-ZnO/p-Si heteroeklemlerin elektriksel karakterizasyonları ($I-V$ ve $C-V$) için elde edilen deneysel sonuçlar irdelenmiştir. Beşinci bölümde elde edilen sonuçlar genel olarak özetlenmektedir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

Bu bölüm, yarıiletken malzemeler ve özellikle saydam iletken oksit malzemeler hakkında genel bilgiler içermektedir. Ayrıca, yarıiletken malzemelerden meydana gelen hetero ve homoeklem ve bu eklemelerin karakterizasyonu ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmektedir.

2.1. Yarıiletkenler

Malzemeler, yalıtkan, metal, yarı-metal ve yarıiletken olmak üzere genelde dört ana gruba ayrılır. Başka bir deyiş ile malzemeler elektriksel iletkenlik değerlerine veya enerji-band aralığı (E_g) değerlerine (Kittel, 1996) göre de sınıflandırılabilirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Malzemelerin enerji-band aralıklarına göre sınıflandırılması (URL 1)

Enerji-band aralığı ~1-3 eV arasında olan malzemelere yarıiletken malzemeler denir. Yarıiletkenler elementel, bileşik ve alaşım olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir (Çetin, 2010).

(i) *Elementel Yarıiletkenler*: Aynı atomlardan (Ge ve Si) oluşan yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır ve doğada saf halde bulunurlar.

Periyodik cetvelde IV. grup elementlerinden olan Ge ve Si elementel yarıiletkenlere denir (Çizelge 2.1).

(ii) *Bileşik Yarıiletkenler*: Bileşik yarıiletkenler, iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. ZnO, GaAs, InP ve GaN gibi iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektro-negatiflikteki farklılıktan dolayı iyonik ve kovalent bağlanma türlerine birlikte rastlanabilir.

(iii) *Alaşım Yarıiletkenler*: Bileşiğe üçüncü ($In_xGa_{1-x}As$) veya dördüncü bir elementin katılmasıyla $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ meydana gelen yarıiletkenlerdir. Burada x ve y, alaşımı meydana getiren elementlerin oranlarını gösterir (Mutlu, 2010).

Çizelge 2.1. Bazı elementsel, bileşik ve alaşım formundaki yarıiletkenler (Mutlu, 2010)

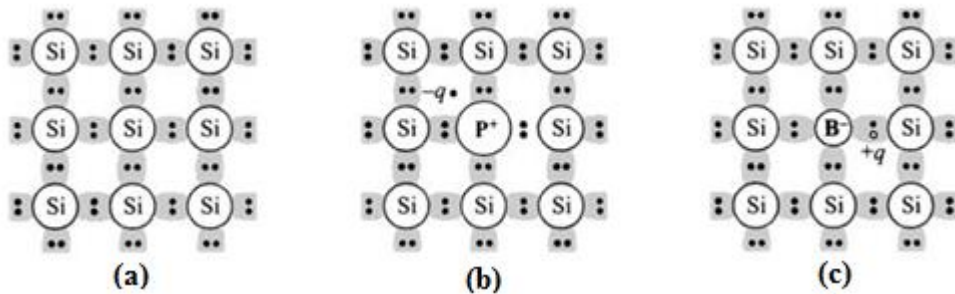
Element Grubu	Yarıiletkenler	
	Sembol	İsim
IV	Si	Silisyum
	Ge	Germanyum
İkili Bileşiklikler		
IV-VI	SiC	Silisyum karbit
III-V	AlAs	Alüminyum arsenit
	GaN	Galyum nitrat
	GaP	Galyum fosfat
II-VI	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
IV-VI	PbS	Kurşun sülfür
	PbTe	Kurşun tellür
Üçlü Bileşim	$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
	$Ga_xAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat
Dörtlü Alaşım	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Galyum indiyum arsenik fosfat
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

Hiçbir kirlilik ve kristal kusur içermeyen mükemmel bir yarıiletken kristal i-tipi (saf, özden “intrinsic”) olarak adlandırılır (Colinge ve diğ., 2011). Yarıiletken kristalini

oluşturan atomlardan bir kısmının yerine uygun katkı atomlarının yerleştirilmesi işlemi “katkılama” olarak adlandırılır. Yarıiletken katkı atomlarının türlerine göre n-tipi (serbest taşıyıcı çoğunlukla elektron) veya p-tipi (serbest taşıyıcı çoğunlukla deşik) olarak isimlendirilir. Bu şekilde farklı isimlendirilen yarıiletkenlerin uygun şekillerde bir araya gelmeleriyle teknolojik açıdan önem taşıyan eklem diyot (pn), transistör (nnp veya pnp), fotodedektörler (p-i-n) gibi aygıtlar yapılabilir. Bununla beraber, katkılama işleminin dışında yapıda gözlenen kusurlar da yarıiletkenin elektriksel özelliklerini etkileyebilir. Örnek olarak, nokta kusurları; malzemedeki istem dışı kirlilik olarak ya da isteyerek büyütme sırasında bilinçli olarak oluşturulabilir. Genelde, safsızlıkların çoğu örgüde olmaması gereken bir atomun yer alması, kristali oluşturan bir atomun kendi yerinde değil de başka bir atomun yerinde bulunması veya atomun olması gereken yerde bulunmamasından kaynaklanan safsızlıklar şeklinde ortaya çıkar. Bunlar nokta kusurları olarak da adlandırılırlar. İsteğe bağlı oluşan safsızlıklar katkı atomlarıdır bunlar vericiler (donor) ve alıcılar (acceptor) olarak sınıflandırılır.

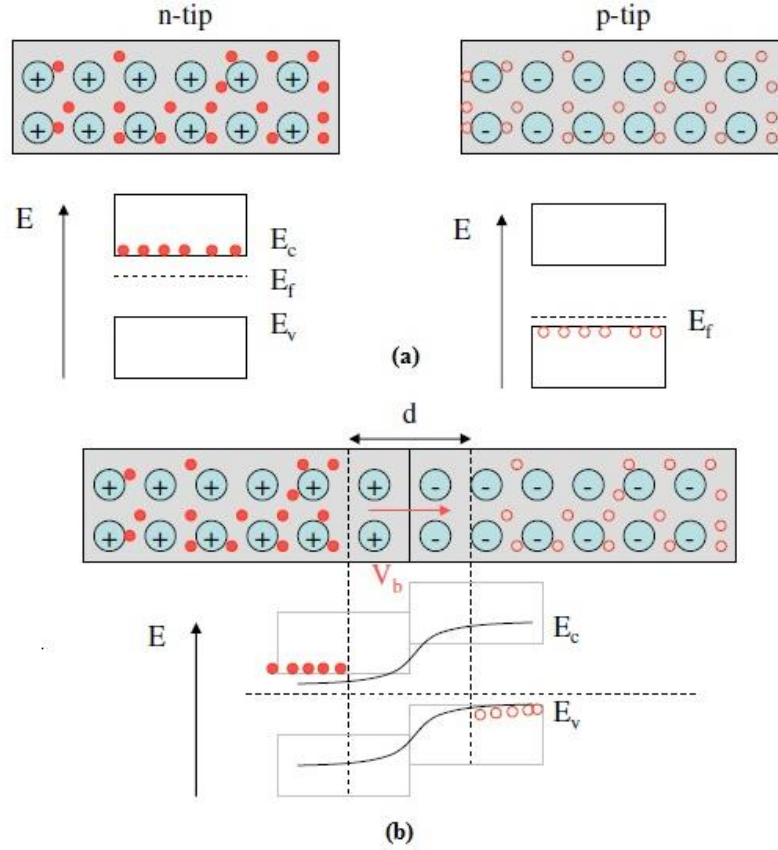
2.2. Homoeklemler

Aynı elementin farklı atomlarla katkılanarak oluşturulan n ve p tipi yarıiletkenlerin birbirleri ile etkileşmesiyle meydana gelen eklemlere homoeklem denir. Şekil 2.2’de elementsel yarıiletkenlerden silikonun uygun katkı atomları ile katkılanmış biçimleri (n-tipi ve p-tipi) gösterilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Silikon elementinin atom yapısı, (b) n-tipi Si (fosfor (P) katkılı), ve (c) p-tipi Si (boron (B) katkılı) (Sze ve Kwok, 2007)

Silikona uygun element katkısı ile elde edilen n-tipi ve p-tipi yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşan homoeklemin enerji-band grafiği Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Sarı, 2009). Ana element her iki yarıiletkende de Si olduğu için metalürjik eklem oluşturulduğunda ara yüzeydeki band süreksizliği veya band ofset oluşumu gözlenmez.



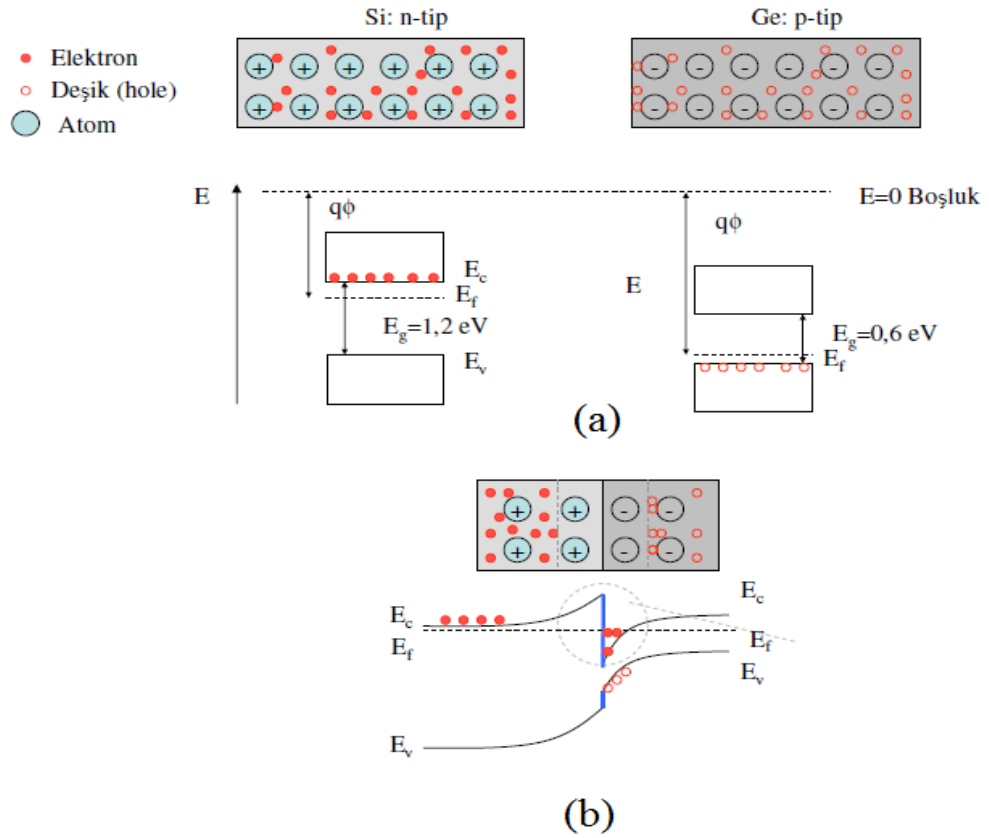
Şekil 2.3. (a) Silikondan n ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşmeden ve, (b) değişikliklerle sonraki enerji-band grafikleri (Sarı, 2009)

Eklemi oluşturan p ve n-tipi yarıiletkenler bir araya geldiklerinde iki taraftaki yük yoğunlukları farklı oldukları için yük akışı meydana gelir. Bu yük akışı denge konumuna gelinceye kadar devam eder. Bir başka deyişle Fermi enerji (E_F) seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. n-tipi yarıiletken tarafındaki elektronlar p-tipi yarıiletkenler tarafına geçerek buradaki boşluklarla birleşirler. n-tipi yarı iletken tarafından ayrılan elektronlar arkalarında pozitif hareketsiz iyonlar bırakırlar. Hareketli yüklerden arınan, kalınlığı d ile gösterilen ve tükenme bölgesi (depletion region) olarak

isimlendirilen bu bölgede oluşan yapısal elektrik alan, daha fazla elektronun n-tipi yarıiletken tarafından p-tipi yarıiletken tarafına geçmesini engeller ve denge durumu oluşur.

2.3. Heteroeklemler

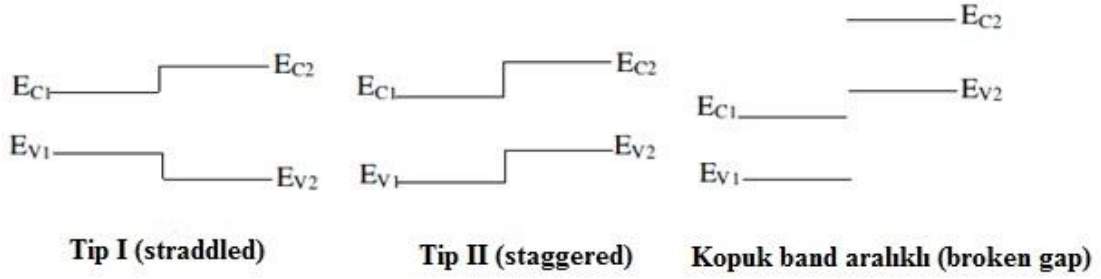
Heteroeklemler farklı türden n-tipi ve p-tipi iki yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşan eklemlerdir. n-tipi Si ile p-tipi Ge yarıiletkenlerden oluşan heteroeklemin enerji-band grafiği Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Sarı, 2009).



Şekil 2.4. n-tipi Si ile p-tipi Ge yarıiletkeninin eklem oluşmadan önceki (a) ve sonraki (b) enerji-band diyagramları (Sarı, 2009)

Eklemi oluşturan yarıiletkenlerin enerji-band aralıklarının farklı olması nedeni ile metalürjik eklem oluşturulduğunda ara yüzeydeki band süreksizliği veya band ofset oluşumu heteroeklemlerin en önemli özelliklerinden birisidir. Heteroeklemlerde band ofset

oluşumu akım taşıma sürecinde önemli rol oynar. Ayrıca eklemi oluşturan yarıiletkenlerin enerji bandlarının birbirine göre olası şekilleri (Ali, 2008) ile Tip I (straddled), Tip II (staggered) ve kopuk band aralıklı (broken gap) heteroeklemler olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.5) (Ali, 2008) .



Şekil 2.5. Heteroeklemlerin enerji-band diyagramlarına göre sınıflandırma

İlk heteroeklem 1960 yılında Anderson tarafından Ge ve As katkılı Ge kullanılarak (Ge/GeAs) oluşturulmuştur. Anderson (1962) kendi adı ile anılan model ile enerji-band diyagramını kullanarak, heteroeklemlerde akım iletim mekanizmalarını açıklamaya çalışmıştır. Her ne kadar ideal durumlar düşünülerek geliştirilmiş olsa da bu model, heteroeklemler için temel olarak kabul edilir. Arayüzey durumlarının olmadığı bir eklemden akım taşıma süreçlerinden band offset üzerinden yarı-nötral bölgeye enjekte edilen taşıyıcıların sorumlu olduğu kabul edilir.

Anderson modeli ile yarıiletkenlerin band aralıkları (E_{g1} ve E_{g2}), elektron ilgileri (χ_1 ve χ_2), iş fonksiyonları (ϕ_1 ve ϕ_2), katkı atom yoğunlukları (N_1 ve N_2), dielektrik sabitleri ϵ_1 ve ϵ_2 ile heteroeklemin ara yüzeyindeki band bükülmesi ve band süreksizlikleri arasındaki ilişkiyi açıklar. Modele göre;

$$\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 \quad (2.1)$$

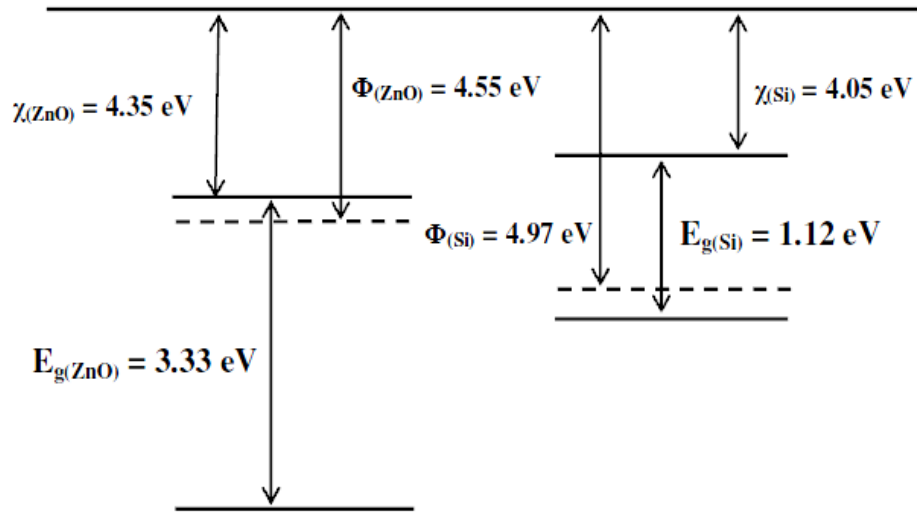
$$\Delta E_v = (E_{g1} - E_{g2}) \pm \Delta E_c \quad (2.2)$$

$$V_{bi} = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.3)$$

$$V_{bi} = V_1 + V_2 \quad (2.4)$$

$$\frac{V_{b1}}{V_{b2}} = \frac{N_2 \epsilon_2}{N_1 \epsilon_1} \quad (2.5)$$

ΔE_c ve ΔE_v sırası ile iletkenlik ve değerlik band süreksizlikleri olup Tip I heteroeklemler için Eşitlik 2.2’de fark ($-\Delta E_c$) alınır. Tip II heteroeklemler için ise ($+\Delta E_c$) eklenir. Ortak işaret kabulüne göre 1. yarıiletkenin değerlik bandı, 2. yarıiletkenin değerlik bandından büyük ise ΔE_v pozitif değerdir. Isıl denge durumunda yarıiletkenlerin V_{bi} ’leri başka bir deyişle band bükülmeleri band oranı eşitlik (2.5) ile verilmiştir. Tip II türünde heteroeklem yapısındaki p-Si/n-ZnO için Anderson modeli ile enerji-band grafiği Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Anderson modeli birçok farklı heteroeklem için band süreksizliklerini açıklayabilirken, bu eklemlerin deneysel olarak elde edilen $I-V$ değişimleri ile model arasında genelde uyumsuzluk vardır.



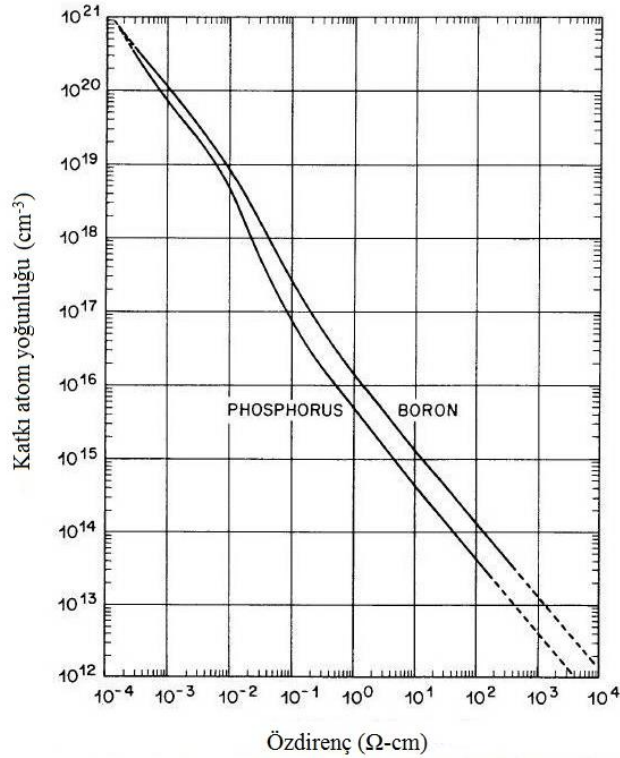
Şekil 2.6. n-ZnO /p-Si heteroeklemin sıfır belsem durumunda enerji-band diyagramı

2.4. n-ZnO/p-Si Heteroeklemler

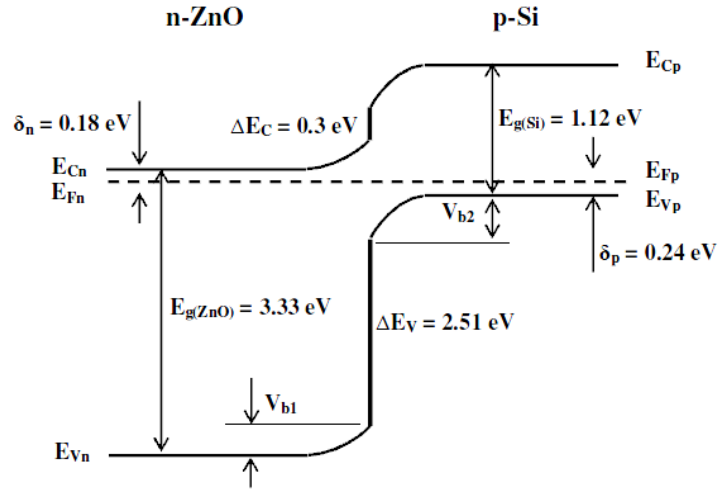
p-tipi Si (100) 0,1 -1 Ωcm altaşlar için katkı atom konsantrasyonu N_A , (2×10^{16} - 3×10^{17}) $1/\text{cm}^3$ arasında değişir (Şekil 2.7). Bu tez çalışmasında alıcı atom (N_A) konsantrasyonu ortalama $1,6 \times 10^{17}$ $1/\text{cm}^3$ olarak alınmıştır. Şekil 2.8'de, ısıl denge durumunda keskin heteroeklem için enerji-band diyagramı gösterilmektedir. Ayrıca alıcı yoğunluğu N_A teorik olarak,

$$N_A = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.6)$$

denklemden hesaplanır. Bu ifadeye elektronun yükü $e=1,6 \times 10^{-19}$ C, kullanılan p-tipi Si'un özdirenci (ρ) 0,1-1 Ωcm ,deşiklerin mobilitesi $\mu_p=450 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 'dir. Bu değerler yardımı ile katkı atom konsantrasyonu bulunabilir.



Şekil 2.7. Altaş olarak kullanılan p-tipi (100) Si için katkı atom konsantrasyonunun özdirenci ile değişimi (URL 2)



Şekil 2.8. n-ZnO /p-Si heteroeklemin ısı dengedeki enerji band grafiği (Ali, 2008)

Literatürde ZnO için enerji $E_g=3,10-3,33$ eV ve Si için de $E_g=1,12$ eV olarak rapor edilmektedir (Sze ve Kwok, 2007). Elektron ilgisi (χ) ZnO için 4,35 eV ve Si için 4,05 eV (Ali, 2008) dur. $\Delta E_C=0,3$ eV değeri ve eklemi oluşturan yarıiletkenlerin band aralıkları dikkate alındığında değerlik bandı ofset değeri;

$$E_V = (E_{g,ZnO} - E_{g,Si}) + \Delta E_C = 2.51 \text{ eV}$$

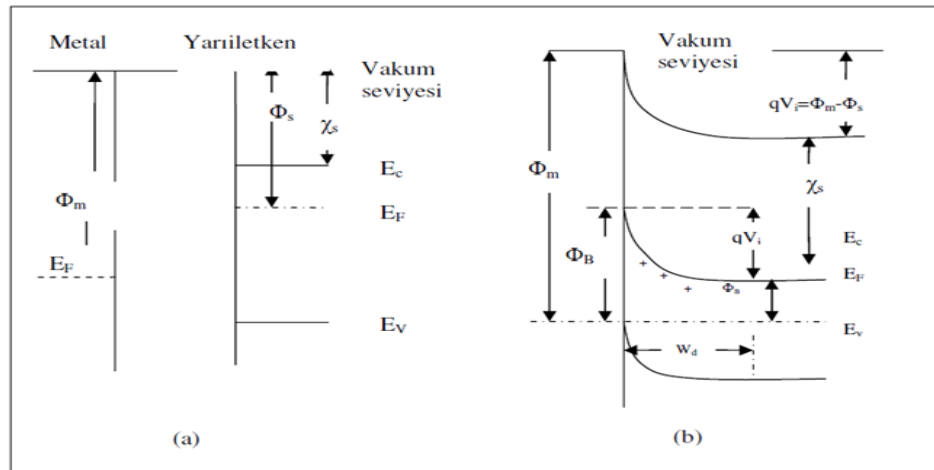
olarak hesaplanır. Değerlik bandı ofset değerinin ($\Delta E_v=2,51$ eV) iletkenlik bandı ofset değerinden ($\Delta E_c=0,3$ eV) büyük olması hole hareketini önler. Böylece bu heteroeklemin iletkenlik özellikleri iletkenlik bandındaki elektronlar tarafından belirlenir. Bu, açıklama ideal durum içindir böyledir. Gerçek iletkenlik özelliklerinin anlaşılması için heteroeklemin gerçek band yapısının belirlenmesi gereklidir. Toplam built-in potansiyeli, esas olarak heteroeklemi oluşturan yarıiletkenlerin (ZnO, V_{b1} ve Si, V_{b2}) built-in potansiyellerinin toplamı (Sze ve Kwok, 2007) olarak ifade edilir.

Heteroeklem temelde çok sayıda diyotun seri bağlı olduğu yapılardır. p- tarafında kontak için kullanılan metal yarıiletken (Schottky diyot) Ag/p-Si diyot, sonrasında p-Si/n-ZnO diyot ve son olarak n-tarafında n-ZnO/Ag metal yarıiletken diyot

bulunur. Fakat uygulamada yarıiletken içindeki yüzey safsızlıkları metal kontaklar ile temas halinde oldukları için tükenme bölgesi genişliğini büyük ölçüde azaltırlar ve bu sayede metal-yarıiletken eklem diyot davranışı nispeten gözlenmez.

2.5. Metal Yarıiletken Eklemler

Metal, yarıiletken ile kontak edildiğinde, ısıl denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkene, yarıiletkenden metale elektron geçişi; metal ile yarıiletkenin E_F değerlerinin eşit olduğu ısıl denge durumuna kadar devam eder (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. (a) Metal/ n-tipi yarıiletken eklemine birleşmeden önce, (b) birleşmeden sonraki enerji-band diyagramları (Sze ve Kwok, 2007)

2.5.1. p-n Eklem Diyotların Akım - Voltaj Karakteristiği

İdeal bir p-n eklem için akım ile voltaj arasında Shockley ve Read (1952) tarafından verilen,

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

ifadesi kullanılabilir. Burada I_s geri besleme doyum akımı, V uygulanan voltaj, q elektriksel yük, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklıktır. kT/q değeri ısısal voltaj olarak da ifade edilmektedir. Buna göre geri besleme durumundaki doyum akımı voltajından bağımsız iken, ileri besleme durumunda akım uygulanan voltaj ile üstel ($\exp(qV/kT)$) değişmektedir. Bununla beraber ideal olmayan durumlarda, özellikle tükenme bölgesinde taşıyıcıların yeniden birleşmeleri ve üretimi nedeni ile oluşan akımlar, Sah ve diğ. (1957) tarafından dikkate alınmıştır. Böylece uzay-yükü yeniden birleşme-üretim kuramı geliştirilmiştir. Bu kurama göre, geri besleme durumunda akım voltajla değişmekte ve ileri besleme durumda akım üstel olarak $\exp(qV/2kT)$ şeklinde değişmektedir. İdeal durumdan olan bu sapma üstel ifadeye η parametresinin dahil edilmesiyle hesaba katılır. Buna göre,

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

biçiminde ifade edilir.

Burada ki idealite faktörü (η) veya ideallikten sapmayı gösteren kalite faktörü olarak isimlendirilmektedir. Yeniden birleşme-üretim akım kuramına göre (Sah ve diğ., 1957) idealite faktörü $1 < \eta \leq 2$ şartını sağlamaktadır. Bu kurama göre idealite faktörünün 1 olduğu durumda ileri besleme akımı için sözde-nötral bölgedeki azınlık taşıyıcılarının yeniden birleşmeleri baskın olur ve akım difüzyon ile sınırlandırılır. İdealite faktörünün 2 olduğu durumda ise tükenme bölgesinde taşıyıcıların yeniden birleşmeleri baskın olmaktadır.

Yüzey durumlarındaki yeniden birleştirme, band aralığı içinde taşıyıcıların tünellemesi, büyük ileri besleme voltajlarında yüksek konsantrasyonda taşıyıcı enjeksiyonu ve sözde-nötral bölgede ve dış kontaklardaki voltaj farkı gibi etkilerin hesaba katılması durumunda idealite faktörü $\eta > 2$ olmaktadır. Bu durumların dışındaki

voltaj düşmesi büyük değerdeki besleme voltajları için seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır. Buna göre akım-voltaj değişimi,

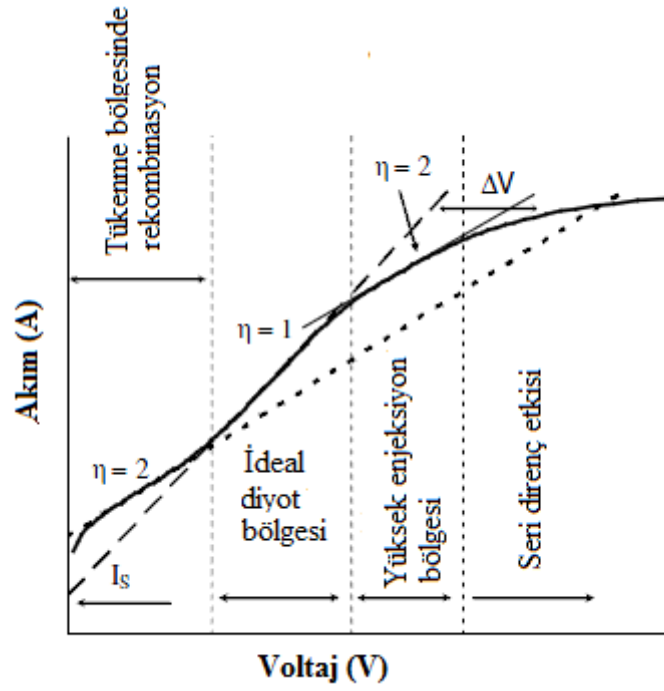
$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{qV - IR_s}{\eta kT} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

olarak ifade edilebilir. Burada R_s seri direnç olup IR_s yarı-nötral bölgedeki voltaj düşmesidir. Bu seri direnç etkisi nedeni ile ileri beslemede akım, voltaj ile üstel değişim yerine doğrusal değişim gösterir (Şekil 2.10).

DC akım-voltaj ölçümleri yardımı ile p-n eklemlerin doyum akım değeri, idealite faktörü, seri direnç değeri vb. parametreleri belirlenebilmektedir. Bunun için yarı logaritmik ölçekte akım-voltaj değişimi kullanılır. $V > 3kT/q$ durumunda seri direnç etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda log I - V değişimi,

$$\ln(I) = \ln(I_s) + \frac{qV}{\eta kT} \quad (2.10)$$

kullanılarak idealite faktörü $\eta = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)}$ ve düşey ekseni kesim noktası yardımı ile I_s değeri hesaplanabilir.



Şekil 2.10. p-n eklem diyotunun yarı-logaritmik akım-voltaj değişimi (Ali, 2008)

Şekil 2.10’da gösterilen log I - V değişiminin şematik incelemesi dört bölgede yapılabilir. Genellikle yüksek enjeksiyon bölgesi seri direnç etkisi ile maskelenir. Farklı bölgeler için farklı idealite değerleri hesaplanabilir. Yüksek besleme voltaj değerleri için akımın üstel değişimden sapması gözlemlenebilir (Bilgin, 2003).

2.5.2. p-n Eklem Diyotların Kapasitans - Voltaj Karakteristiği

Eklem diyotlarının karakterizasyonu için kullanılan bir başka teknik ise kapasitans-voltaj (capacitance-voltage, C - V) değişimleridir. C - V değişimi yardımı ile V_{bi} ve katkı konsantrasyonu belirlenebilir. Keskin eklem için tükenme bölgesi kapasitesi C , uygulanan voltaj V_a , V_{bi} , katkı yoğunlukları N_1 ve N_2 ve dielektrik sabiti ϵ_1 ve ϵ_2 olmak üzere kapasitans ile voltaj arasındaki ilişki (Milnes ve Feucht, 1972) aşağıdaki gibidir:

$$C^2 = \frac{qA^2 N_1 N_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2(N_1 \varepsilon_1 + N_2 \varepsilon_2)(V_{bi} - V_a)} \quad (2.11)$$

Bu ifade yeniden düzenlenerek,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(N_1 \varepsilon_1 + N_2 \varepsilon_2)(V_{bi} - V_a)}{qA^2 N_1 N_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad (2.12)$$

ifadesini bulabiliriz.

$1/C^2 - V_a$ değişiminde eğim $\frac{2(N_1 \varepsilon_1 + N_2 \varepsilon_2)}{qA^2 N_1 N_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2}$ ve düşey eksen kesim noktası ile de V_{bi} değeri hesaplanabilir.

Kapasitans-frekans değişimleri kullanılarak, ideal p-n eklem için ara yüzey durumlarının olmadığı kabul edilse de, p-n eklem için ara yüzey durum yoğunluğunu tanımlamak için kullanılır (Özyurt Kuş, 2010). Ölçüm frekansı düşürüldükçe, ara yüzey veya ara yüzeyin yanındaki daha derin düzeyler AC sinyallere cevap verebilmektedir. Böylece daha büyük kapasitans üretilmektedir. Tüketim ve ara yüzeye bağlı toplam durum sayısı düşük frekans ve yüksek frekanstaki yüksek frekanstaki kapasitans sadece tüketim ile ilişkilidir kapasitans ölçümlerinden hesaplanabilir. Yüksek frekanstaki kapasitansı (Capacitance at High Frequency, CHF), tüketim bölgesi kapasitansı ve düşük frekanstaki fazlalığı ise ara yüzey (Capacitance at Interface State, CIS) durumlarıyla ilişkilendirilebilir. Tüketim bölgesi Fermi seviyesindeki durum yoğunluğu (Number of Interface State, NIS), ara yüzey durumlarının en düşük limiti basitçe eşitlik 2.13 ile hesaplanabilir (Tavakolian ve Sites, 1988).

$$N_{IS}(cm^{-2}eV^{-1}) = \frac{(C_{LH} - C_{HF})\left(\frac{F}{cm^{-2}}\right)}{q(C)} \quad (2.13)$$

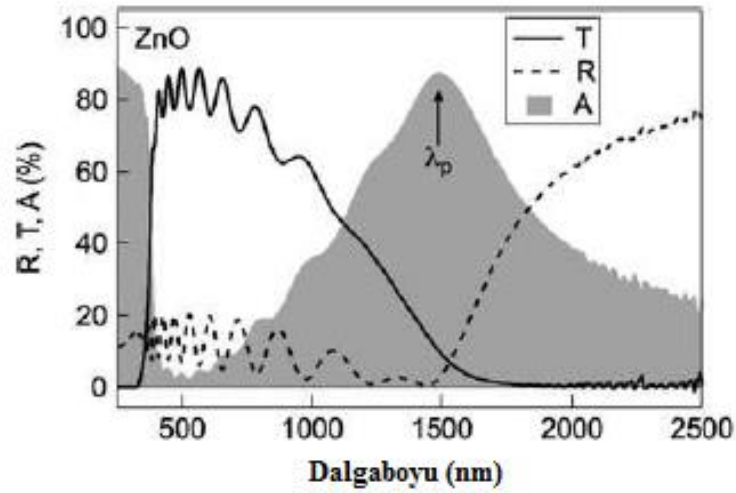
2.6. Saydam İletken Oksit (SİO) Malzemeler

Dünyamızda enerji tüketimi giderek artmaktadır. Bu artış ile birlikte enerji üretimin konusunda çevreci teknolojiler önem arz etmektedir. Özellikle CO₂ salınımını azaltmak ve sürdürülebilir bir hayat için üretimden tüketime kadar olan zincirde uzun ömürlü ve kolayca teknik açıdan servis edilebilen malzemelerin kullanıldığı teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktaları dikkate aldığımızda yeşil teknolojiler için SİO malzemeler önem taşımaktadır. Bu bakımdan, özellikle son yıllarda SİO malzemeler ve bunların uygun elementler ile olan formları çok sayıda araştırmaya konu olmuştur. Bunun temel nedeni, taşınabilir elektronik aygıtlar, esnek göstergeler, çok fonksiyonlu pencereler, güneş pilleri ve hatta transistörlerin kullanıldığı teknolojilerdeki hızlı gelişmelerdir. SİO malzemeler, güneş pillerinde soğurucu bileşen olarak; otomobil ve uçak pencerelerinde saydam ısıtıcı malzeme, bazı laboratuvar ve ev gereçlerinin pencerelerinde anti-statik kaplamalarda, binalardaki pencerelerde ve akkor lambalardaki ısı yansıtan kaplamalarda, ışığın yansıtılmasının istenmediği yüzeylerde, gaz detektörlerinde, yarıiletken/yalıtkan/yarıiletken heteroeklemlerde, ısıya dayanıklı kaplamalarda, LED'lerde ve ince film transistörlerde (TFT) yaygın olarak kullanılmaktadır (Erarslan, 2010) (Şekil 2.11). Öyle ki bu teknolojiye çok farklı sayıda ve yapıda malzemeler (polimerler, seramikler, camlar, metaller ve plastikler) bir arada kullanılmaktadır. Sahip oldukları bu önem açısından SİO malzemelerin kullanım potansiyelleri artmaktadır. Özellikle yeni n-tipi ve p-tipi özelliklere sahip SİO'lerin davranışlarını anlamak için teorik içerikli çalışmalar da artmaktadır. Son 20 yıl içinde SİO teknolojisi ZnO, SnO₂, In₂O₃ üzerine odaklanmış gözükse de ZnO ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2.11. SİO malzemelerin değişik kullanım alanlarına örnekler

SiO malzemeler, görünür bölgede (400-800 nm) yüksek optik geçirgenliğe (>%80) sahiptirler (Lee, 2006). Söz konusu bölgede hem optik geçirgenlik hem de optik yansıtma spektrumlarında girişim saçakları gözlenebilir. Düşük dalgaboyu bölgesinde banddan banda geçişin gözleendiği için optik geçirgenlik kesime uğrar. Dalgaboyunun 1000 nm değerinden büyük olduğu değerlerde optik geçirgenlik azalırken optik yansıtma değerleri iletkenlik bandındaki elektronların birlikte salınımları (plazma salınımları) nedeni ile artmaya başlar (Şekil 2.12).



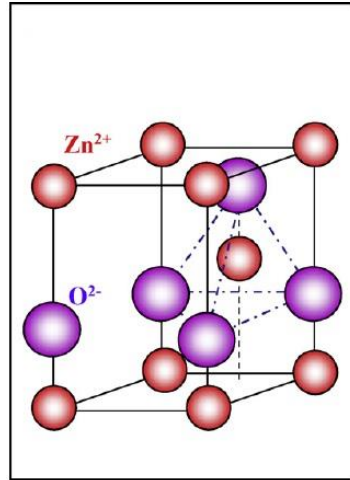
Şekil 2.12. ZnO için dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik spektrum (R:Yansıtma, R:Geçirgenlik A:Absorbans) (Ginley ve diğ., 2010)

Yapıdaki oksijen boşlukları veya arayer atomları nedeni ile SiO malzemeler genelde n-tipi iletkenlik gösterir. Bununla beraber iyi bir iletkenlik değerine sahip (10^3 S/cm) p-tipi SiO malzemeler üretilmesi ise çalışmaların yeni odağı olmuştur. Öyle ki Cu tabanlı CuAlO_2 ve SrCu_2O_3 p-tipi iletkenlik göstermelerine rağmen katkı konsantrasyonu ($N \leq 10^{18} / \text{cm}^3$) ve mobilite değerleri ($\mu < 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) oldukça düşüktür (Erarslan, 2010). 1999 yılından sonra optoelektronikte yaygın olarak kullanılan GaAs benzeri özellikler sergileyebilecek p-tipi ZnO elde etmek için büyük bir yarış başladı. Ancak elde edilen p-tipi ZnO malzemeler kararlı değildi ve tekrarlarında sorunlar yaşandı. Buna ek olarak birçok araştırma grubu bu konuda çalışmalarını

sürdürmektedir. Çünkü ZnO, Mg, Cd eklenerek band aralığı değeri değiştirilebilmekte ve ayrıca Co gibi katkılarla da spintronik konusunda uygulama alanı bulabilmektedir.

2.6.1. Çinko Oksit (ZnO)

SiO ailesinin bir üyesi olan ZnO, özellikle fotovoltaik uygulamalarda tercih edilmektedir. Geniş band aralığına sahip olması GaN'a rakip olması için yeterlidir. ZnO genellikle hegzagonal wurtzite kristal yapısına sahiptir. (Şekil 2.13) Zn veya O atomu 4 komşu atom ile çevrelenmiştir. Bununla beraber hipotetik olsa da Zincblende yapısı da vardır. Örgü parametreleri $a = 3,249 \text{ \AA}$, $c = 5,205 \text{ \AA}$ olup $c/a = 8/3 = 1,633$ tür (Çizelge 2.2) (Erarslan, 2010). Wurtzite yapı a ve c olan iki örgü parametresi ile hegzagonal birim hücreye sahiptir (Özgür ve diğ., 2005). Wurtzite ZnO yapısının şematik gösterimi Şekil 2.13'te gösterilmiştir (Lee, 2006). ZnO'nun molekül ağırlığı 81,408 gram olup beyaz gevşek yapılu bir tozudur. ZnO geniş enerji-band aralığına (3,1-3,3 eV) sahip n-tipi yarıiletken olup, 300 °C'ye kadar ısıtıldığında limon sarısı renge dönüşür. Soğutulduğunda ise eski rengine döner. 1000 °C'de buharlaşmaya başlar. En yakın komşu anyon katyon uzaklığı 1,96 Å'dur.



Şekil 2.13. ZnO yarıiletkeninin Wurtzite kristal yapı modeli (Wang, 2009)

ZnO ince filmlerinin diğer oksit filmleri ile karşılaştırıldığında yüksek kimyasal ve mekanik kararlılığa sahip olmaları, bununla birlikte iyi optik ve elektriksel göstermeleri, bu malzemelere özel önem kazandırmaktadır.

Çizelge 2.2. ZnO'nun fiziksel özellikleri

Özellikler	Değerler
Örgü sabitleri (T=300K)	
a_0	0,32469 nm
c_0	0,52069 nm
Yoğunluğu	5,606 g/cm ³
Erieme noktası	P=52bar için 2248K
Dielektrik sabiti	8,66
Band aralığı	3,4 eV (direkt)
Taşıyıcı konsantrasyonu	<10 ⁶ cm ⁻³
Eksiton bağlanma enerjisi	60 meV
Elektron etkin kütlesi	0,24
Elektron mobilitesi(T=300K)	200 cm ² /Vs
Deşik etkin kütlesi	0,59
Deşik mobilitesi	5-50 cm ² /Vs

SiO ailesinden olan indium kalay oksit (Indium Tin Oxide, ITO) çok kullanılan bir alttaş malzemesidir. ITO, kaplama yapıldığı alttaş ile etkileşerek çok iyi bir yapışkanlık gösterdiğinden elektronik ve mekanik uygulamalarda yaygın kullanılan saydam iletkenlerin en önemlisidir (Kamei ve diğ., 2001). Ancak, diğer saydam iletken oksitler de, kaplama kolaylığı, düşük maliyet, kırmızı-altı (IR) yansımaları, optik geçirgenlik ve minimum yüzey direnci özelliklerinden dolayı ITO'ya alternatif olarak çok sayıda bilimsel araştırmaya konu olmuşlardır. Özellikle II ve VI grup elementlerinin elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik değerlerinin katkı elementlerine (Çizelge 2.3'te gösterilen ikili, üçlü ve dörtlü bileşikler) bağlı değişim gösterdiği rapor edilmiştir (Nadeem ve diğ., 2000; Kotlyarchuk ve diğ., 2005; Rusu ve diğ., 2005; Ferreira ve diğ., 2006).

Çizelge 2.3. II ve VI grup elementlerinin bazı ikili, üçlü ve dörtlü bileşikleri

Malzeme	Katkı olarak kullanılan element ya da bileşik
SnO ₂	Sb, F, As, Nb, Ta
In ₂ O ₃	Sn, Ge, Mo, Fe, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, W, Te,
ZnO	Al, Ge, B, In, Y, Sc, F, V, Si, Ge, Ti, Zr, Hf
CdO	In, Sn
ZnO-SnO ₂	Zn ₂ SnO ₄ , ZnSnO ₃ ,
ZnO-In ₂ O ₃	Zn ₂ In ₂ O ₅ , Zn ₃ In ₂ O ₆
In ₂ O ₃ -SnO ₂	In ₄ Sn ₃ O ₁₂
CdO -SnO ₂	Cd ₂ SnO ₄ , CdSnO ₄
CdO - In ₂ O ₃	CdIn ₂ O ₄
Ga InO ₃ , (Ga, In) ₂ O ₃	Sn, Ge
CdSb ₂ O ₆	Y
ZnO- In ₂ O ₃ -SnO ₂	Zn ₂ In ₂ O ₅ -In ₄ Sn ₃ O ₁₂
CdO -In ₂ O ₃ - SnO ₂	CdIn ₂ O ₄ , Cd ₂ SnO ₄

Özellikle ZnO ince filmleri diğer oksit filmleri ile karşılaştırıldığında yüksek kimyasal ve mekanik kararlılığa sahip olması, bununla birlikte iyi optik ve iletkenlik özellik göstermesi nedeniyle önem kazanan bir malzemedir.

3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde, tez çalışmasına konu olan ZnO SİO filmlerin ve n-ZnO/p-Si heteroeklemlerin elde edilmesinde kullanılan alttaşların temizlenmesi, UKP sistemi ve hazırlanan filmlerin yapısal ve optik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel teknikler anlatılmıştır.

3.1. Cam Alttaş Hazırlama

Üzerine ZnO biriktirilecek cam alttaşlar, uygun boyutlarda bir elmas kesici (MTI Corporation) ile kesilerek elde edilen mikroskop camlarından oluşturulmaktadır (Cat. No. 7102). Cam alttaşların temizlenmesinde aşağıdaki adımlar izlenmiştir (Öztaş, 1996):

- 1. Adım:** Cam alttaş, üzerindeki tozların temizlenmesi için deiyonize (DI) suya daldırılır ve ultrasonik titreştiricide 15 dakika bekletilir. Daha sonra DI sudan çıkartılıp kurutulur.
- 2. Adım:** Kurutulmuş alttaş, üzerindeki yağların temizlenmesi için metil alkole daldırılır ve ultrasonik titreştiricide 15 dakika bekletilir. Daha sonra metil alkolden çıkartılıp kurutulur.
- 3. Adım:** Kurutulmuş alttaş, pürüzsüz yüzeye sahip olması için isopropil alkole daldırılır ve ultrasonik titreştiricide 15 dakika bekletilir. Daha sonra isopropil alkolden çıkartılıp kurutulur.
- 4. Adım:** Son olarak, diğer süreçlerden kalan kalıntıların temizlenmesi için alttaş, asetona daldırılır ve ultrasonik titreştiricide 15 dakika bekletilir. Daha sonra asetondan çıkarılıp kurutulularak temizleme süreci tamamlanır.

3.2. Si Alttaş Hazırlama

Eklem yapıdaki örnekler için kullanılan (100) yönelimli 0,1-10 Ωcm öz direnç değerine sahip p-Si alttaşlar, literatür de standart temizleme işlemi (Standard Clean, SC) olarak bilinen yöntem ile temizlenerek kullanıma hazır hale getirildi (URL 3 2014). Bu

yönteme göre, DI suya batırılan alttaş (SC), 75-80 °C’de ısıtılan 1:1:5 hacim oranındaki NH₄OH (amonyum hidroksit) + H₂O₂ (hidrojen peroksit) + H₂O (su) karışımı içinde 10 dakika bekletilmiştir. Ardından tekrar DI su içine bırakılmıştır. SC-1 adı verilen bu işlem sayesinde Si alttaş üzerinde oluşabilen çok ince SiO₂ tabakası ve metalik kirlilik temizlenebilmektedir. Daha sonra 25 °C’de hacimce 1:50 orana sahip HF + H₂O çözeltisi içine çok kısa süre daldırılmakta ve çıkarılmaktadır. Böylece Si alttaş üzerinde oluşabilen çok ince SiO₂ tabakası ve iyonik kirlilik temizlenebilir. Son olarak SC-2 adı verilen adımda ise 75 - 80 °C’de hacimce 1:1:6 oranına sahip HCl + H₂O₂ + H₂O karışımı kullanılarak yüzeyde kalan kirlilikler ve metalik izler temizlenir. Alttaş üzerinde bulunabilecek kirlilikleri temizlemek için aseton içinde ultrasonik temizleyicide kısa süre bekletilebilmektedir.

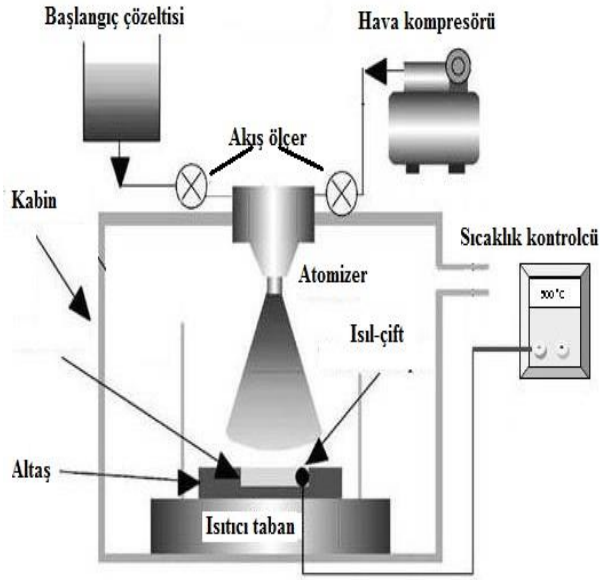
3.3. Sprey Çözeltisi Hazırlama

Bu çalışmada ZnO ince film ve n-ZnO/p-Si heteroeklem oluşturmak için UKP (bak, Bölüm 3.4) tekniği kullanıldı. Filmlerin hazırlanmasında Zn kaynağı olarak çinko asetat dihidrat (Zn(CH₃COO)₂.2H₂O, ZAD) tuzu kullanıldı. 100 mL toplam hacim içinde 0,04 M, 0,08 M ve 0,1 M için gerekli olan madde miktarı ZAD’ın atomik ağırlığı dikkate alınarak [$m_{a[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] = 219,53 \text{ g}$] belirlendi. Çözücü olarak metil alkol (CH₃OH) kullanıldı. Çözeltinin berraklığını artırmak ve hidroksil oluşumunu engellemek için çözeltiliye az miktarda (8-10 damla) asetik asit eklendi. Karışımın homojenliğini sağlamak için hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığında 1-2 saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldı.

3.4. Ultrasonik Kimyasal Püskürtme (UKP) Sistemi

Bu çalışmada kullanılan UKP sistemi esas olarak içinde Zn elementini içeren ön çözelti, bu çözeltiyi kompresör yardımı ile atomize eden osilatör birimi (atomizer) ve alttaş sıcaklığını kontrol eden sıcaklık kontrolcü birimden oluşur. Üzerinde çözelti ve itici gaz girişi bulunan atomizer 100 kHz çalışma frekansına sahiptir. Uygun çözelti ve taşıyıcı gaz kombinasyonu için püskürtme geometrisine (düşey geometri) bağlı olarak itici gaz yardımı ile atomize olmuş sıvı damlacıkları sıcaklığı kontrol edilen alttaş

üzerine gönderilir. Isıtıcı üzerinde duran alttaşın sıcaklığı, sıcaklık kontrolcüsü ($\pm 1^\circ\text{C}$ 'lik hassasiyetle) ve ısıl-çift (chromel-alumel) yardımıyla kontrol edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.1. Bu çalışmada kullanılan UKP sisteminin blok diyagramı (a) ve çalışmanın gerçekleştirildiği UKP sisteminin fotoğrafı (b)

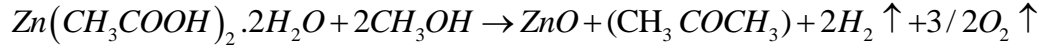
Şekil 3.1'de verilen UKP sisteminde, sabit sıcaklıkta (400°C) tutulan alttaş üzerine gönderilen ön çözeltinin farklı akış hızları için optimizasyon çalışmaları yapıldı. Bu çalışmada elde edilen örneklere ait hazırlama parametreleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Farklı ön çözelti akış hızları için film kalınlıkları, film biriktirme hızı ve grain boyutları

Örnek	Akış hızı (ml/dk)	Film Kalınlıkları (nm)	Biriktirme hızı nm/dk	Grain Boyutları (nm)
Z1	7,22	118	9	--
Z3	0,63	104	3	--
Z5	1,52	1750	44	25
Z6	0,67	278	5	43
Z7	0,53	130	3	42
Z8	0,40	560	6	44

3.4.1. ZnO İnce Film Oluşma Süreci

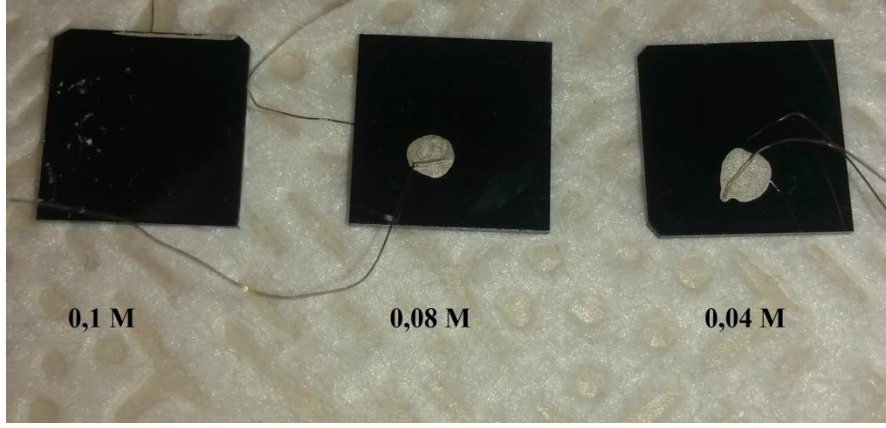
Farklı ön çözelti akış hızları için püskürtülen Zn içeren damlacıklar uygun sıcaklıktaki alttaşa ulaştığında, aşağıdaki kimyasal reaksiyon meydana gelir;



Bu reaksiyon sonucunda CH_3COCH_3 , H_2 ve O_2 buhar ve gaz olarak sistemden ayrılırlar. Bu çalışmada farklı molarite ve ön çözelti akış hızı için $400^\circ C$ alttaş sıcaklığında denemeler yapılarak en uygun hazırlama parametreleri belirlenmiştir.

3.4.2. n-ZnO/p-Si Heteroeklem Eldesi

Şekil 3.2’de ayrıntıları verilen yöntem ile temizlenen Si alttaş ve şekil 3.1’de ayrıntıları verilen yöntem ile temizlenen kuvars alttaşlar aynı zamanda ısıtıcı üzerine yerleştirilmiştir. Böylece eş zamanlı olarak 0,1 M, 0,08 M ve 0,04 M başlangıç çözelti molaritesi kullanılarak cam ve Si alttaş üzerinde üç adet n-ZnO ince film ve üç adet n-ZnO/p-Si eklem elde edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. 0,1 M, 0,08 M ve 0,04 M başlangıç çözelti molaritesi kullanılarak üretilen üç adet n- ZnO/p-Si heteroeklem

3.5. İnce Filmlerin Optik Sabitlerinin Belirlenmesi

İnce filmlerin optik sabitleri denilince optik band aralığı (E_g), filmin kalınlığı (t), kırma indisi $n(\lambda)$, başka bir deyişle dispersiyonu ve optik soğurma katsayısı $\alpha(\lambda)$ dikkate alınır. Bu bölümde optik sabitlerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanacaktır. Bu yöntemlerde esas olarak optik geçirgenlik ve/veya optik yansımaya spektrumlar kullanılır. Bu nedenle, ilk olarak filmlerin optik geçirgenlik ölçümlerinin nasıl elde edildiği anlatılacaktır.

3.5.1. Spektrofotometrik (UV-Vis) Ölçümler

Saydam bir taban üzerine büyütülmüş, kalınlığı sabit, bir amorf veya yarıiletken ince filmin, optik geçirgenlik spektrumu, dalgaboyuna bağlı olarak geçen ışık şiddetinin ölçülmesi ile elde edilir. Buna göre ilgilenilen bölgede yeterli aydınlatmaya sahip ışık kaynakları (tungsten fitilli lambalar, ksenon ark lambaları, döteryum ve hidrojen vb.) kullanılır. Detektör olarak ise fotodiyotlar, CCD dedektörler, foto çoğaltıcı tüpler (PMT) kullanılabilir. Kullanılan spektrofotometreler, ışık kaynağına ve detektörün duyarlı olduğu bölgeye göre morötesi (UV), morötesi-görünür bölge (UV-VIS) veya kızılötesi (IR) gibi isimler alır. Esas olarak gelen ve geçen ışık şiddetinin ölçülmesi işleminde geçirgenlik geçen/gelen ışık şiddeti olarak tanımlanır. Bu nedenle modern spektrofotometrelerde, örneğin olmadığı durumda elde edilen referans spektrumu ve

örneğin bulunduğu durumdaki spektrum değerlendirilerek optik geçirgenlik spektrumu elde edilir. Bununla beraber, klasik yöntem olarak isimlendirilen sistemlerle de [Çok renkli ışıktan tek renkli ışık elde edilmesini sağlayan ve bunun için prizma veya modern teknoloji ile birlikte gelişen optik ağılar (grating) kullanan monokromatör (dalga boyu seçicileri)] optik geçirgenlik spektrumları elde edilebilir. Genelde spektrofotometreler ya tek-ışın demeti ya da iki ışın demeti esası ile çalışırlar. Tek-ışın demeti esası ile çalışan sistemde, monokromatörden çıkan ışın demetinin önüne önce filmlerin biriktirildiği alttaşın, daha sonra da film+alttaş yerleştirilerek, detektör sinyali kaydedilir. Bu iki spektrum beraber değerlendirilerek alttaşın ve filmin optik geçirgenliği (T) elde edilir. İki-ışın demeti esasına göre çalışan sistemde ise monokromatörden çıkan ışık bir ışın bölücü ile ikiye bölünür ve birinci ışın demeti referans detektörü üzerine odaklanırken ikincisi de film+alttaş üzerine odaklanır. Dalgaboyundan bağımsız olacak şekilde referans detektör sinyali bilgisayar veya yardımcı elektronik aygıtlar ile sabit tutularak filmin geçirgenliği elde edilir (Skoog ve diğ., 2006).

Bu tez çalışmasında, örneklerin optiksel geçirgenlik ölçümleri için PG- Instrument T-70 model tek ışın UV-VIS spektrofotometre kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan PG Instrument T-70 model UV-VIS Spektrofotometre

3.5.2. Optik Sabitlerin Belirlenmesi

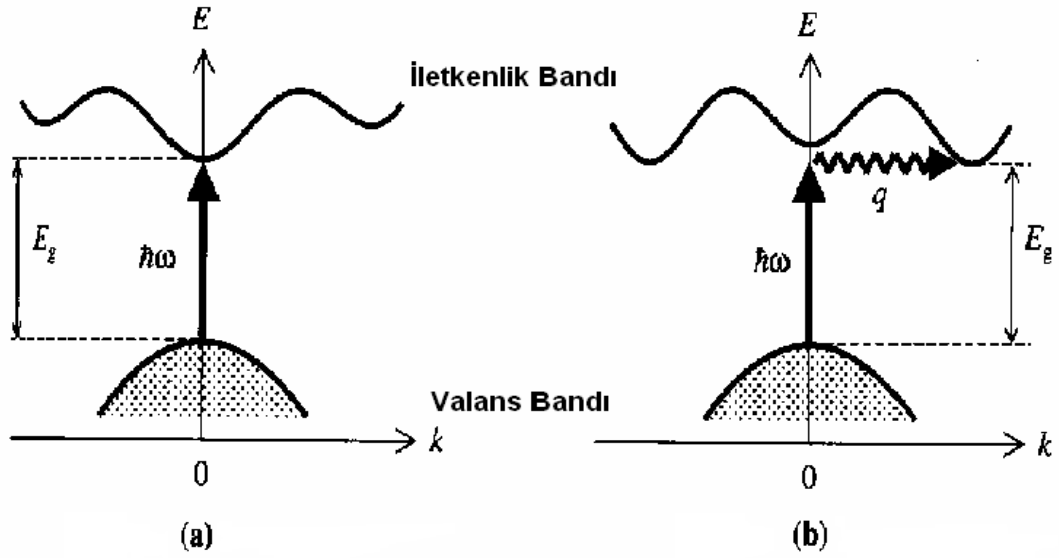
Değişik yöntemler kullanılarak hazırlanan ve üzerinde elektriksel ve optik ölçümler yapılacak ince filmlerin karakterizasyonu için kırma indisinin (n) ve soğurma katsayısının dalgaboyu (veya foton enerjisi) ile değişimi ve film kalınlıklarının belirlenmesi önemlidir. Film kalınlıklarının belirlenmesinde hassas yüzeyli mikrometreler, optik geçirgenlik (normal geliş veya açığa bağlı optik geçirgenlik) (Swanepoel, 1983; Güngör, 1998) ve yansıma spektrumları (Minkov, 1989) veya elipsometrik yöntemler ya da yüzey profil ölçerler kullanılabilir.

Film kalınlığı ve kırma indisi çarpımı için ilgilenilen dalgaboyu bölgesinde sonlu sayıda girişim saçığının gözleendiği durumda klasik bir yöntem olan zarf (Envelope) yöntemi kullanılabilir. Bununla beraber, Birgin ve diğ. (1999) geliştirdiği nokta tabanlı kısıtlamasız minimizasyon algoritması (Pointwise Unconstrained Minimization Algorithm, PUMA) metodu ile hem girişim saçıklarının gözleendiği hem de gözlenemediği durumlarda deneysel ölçülen optik geçirgenlik spektrum verileri değerlendirilerek optik sabitler belirlenebilmektedir. Çünkü, ZnO ve benzer saydam iletken oksit filmlerde kırma indisi, dalgaboyu ile fazlaca değişim göstermektedir. Bunun sonucu olarak film kalınlığına (biriktirme süresi dikkate alındığında) bağlı olarak yeterli sayıda ve derinlikte girişim saçıkları gözlenemeyebilir. Optik geçirgenlik spektrumu esas olarak $\lambda_{min} \leq \lambda_i < \lambda_{i+1} \leq \lambda_{mak}$ şartlarını sağlayan $N_i (i=1,2,\dots,N)$ adet nokta için ölçülen geçirgenlik değerlerinden oluşur $(\lambda_i, T^{ölçülen}(\lambda_i))$. PUMA ile bu N adet denklemin çözümü olan t , $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ değerleri belirlenir. Bunun için $n(\lambda)$ ve $k(\lambda)$ uzayında bazı fiziksel sınır şartların kullanılmasıyla ve belirli bir film kalınlığı değeri ele alınmasıyla, ölçülen ve kuramsal optik geçirgenlik değerleri arasındaki farkı minimum yapan $n(\lambda)$ ve $k(\lambda)$ hızlı bir şekilde hesaplanabilir (Birgin ve diğ., 1999; Erarslan, 2010).

3.5.3. Optik Band Aralığı (E_g)

Yarıiletken malzemeler band yapılarına göre doğrudan (direct) ve dolaylı (indirect) band aralığını sergileyen malzemeler olmak üzere iki kısma ayrılır. İletkenlik bandı minimumu ile değerlik bandı maksimumu aynı k dalga vektörüne karşı gelen

malzemeler, doğrudan band aralığına, değilse dolaylı band aralığı enerji değerine sahiptir. Bu malzemeler için foton soğurulma süreci Şekil 3.4'te gösterilmiştir (Kılınç, 2006).



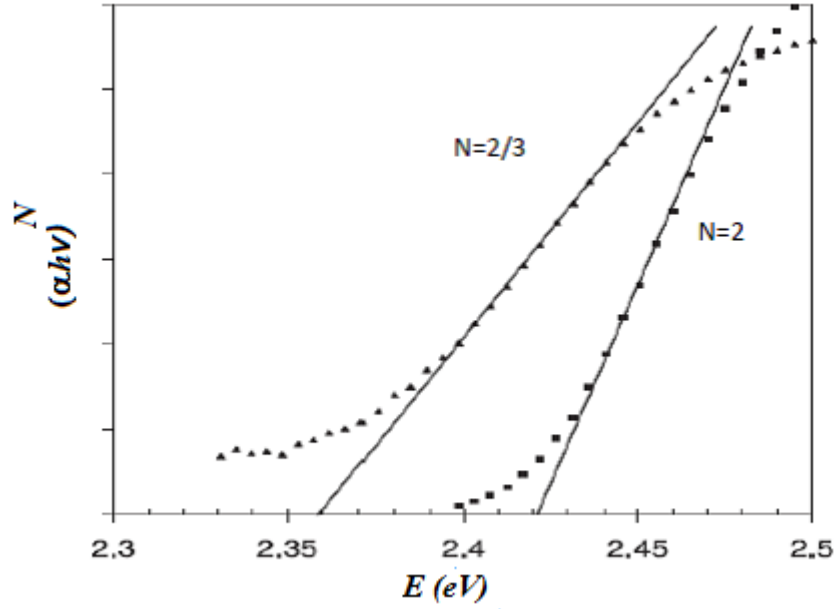
Şekil 3.4. Doğrudan (a), ve dolaylı band aralığına (b) sahip katıların enerji-band diyagramı

Doğrudan ve dolaylı band aralığına sahip bazı malzemeler için soğurma katsayısı ile foton enerjisi arasındaki ilişki kullanılarak yarıiletkenlerin enerji-band aralık değerleri belirlenebilir. Örnek olarak parabolik band yaklaşımına göre doğrudan band geçişinde α ve gelen fotonun enerjisi $h\nu$ ile E_g arasındaki ilişki;

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/N} \quad (3.1)$$

olan ifadesi ile verilir (Tauc ve diğ., 1966). Burada, A sınır genişliği ile ilgili bir parametredir. N ise elektron geçişine bağlı sabit bir değeri temsil eder. N ; doğrudan geçişler için 2 ve dolaylı geçişler için ise 2/3 değerini alır (Subramanyam ve diğ., 1998). Doğrudan band aralığına sahip malzemeler için Tauc çizimi, dolaylı band aralığına

sahip malzemeler için ise Cody çizimi yardımı ile optik band aralığı belirlenebilir (Şekil 3.5) (Kokaj ve Rakhshani, 2004).

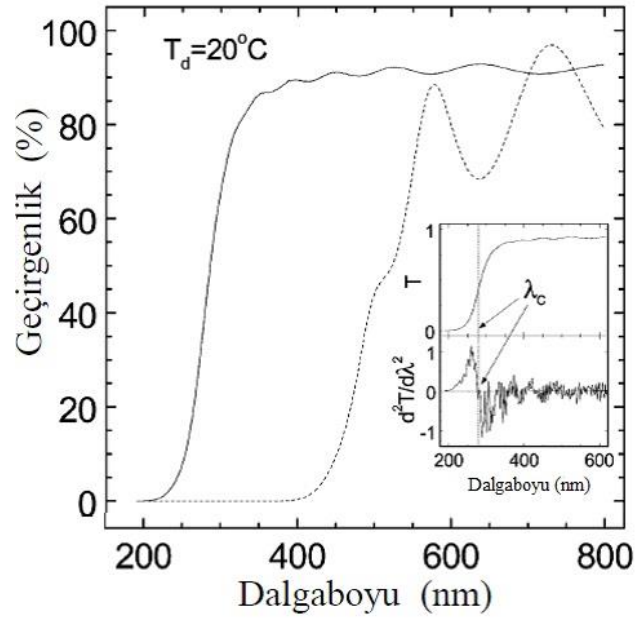


Şekil 3.5. Doğrudan ve dolaylı band aralığına sahip malzemeler için optik bandaralığının sırası ile 2,42 eV ve 2,36 eV olarak belirlendiği Tauc ve Cody çizimleri

ZnO ince filmlerin optik band aralığının belirlenmesinde UV-Vis bölgesindeki optik geçirgenlik spektrumlarının dikkate alındığı alternatif bir yöntem daha vardır. Bu yöntemde göre, esas olarak optik geçirgenlik spektrumunun dalga boyuna göre ikinci türevinin sıfıra eşit olduğu dalga boyu kritik dalga boyu λ_k ile optik band aralığı arasında,

$$\lambda_k (nm) = \frac{1240}{E_g (eV)} \quad (3.2)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Dolbec ve diğ. (2002) SnO₂ için optik geçirgenlik spektrumunun dalga boyuna göre ikinci türevini alarak optik band aralığını belirlemişlerdir (Şekil 3.6) .

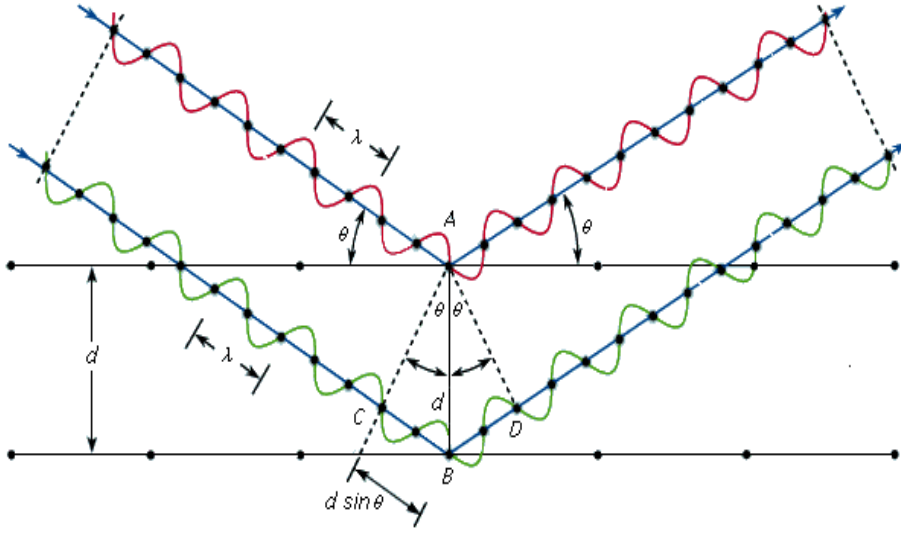


Şekil 3.6. Kritik dalgaboyu yöntemi ile optik band aralığının belirlenmesi (Dolbec ve diğ., 2002)

3.6. İnce Filmlerin Yapısal İncelenmesi

Elektromanyetik dalga spektrumunda dalgaboyu 10^2 - 10^5Å olan bölgeye X-ışınları bölgesi denir. Kristal yapıda atomlar arası mesafe ile X-ışınları dalgaboyu aynı mertebededir. Bu nedenle özellikle kristal yapı ile etkileşir. Bu etkileşimde kristale gönderilen X-ışınlarının geçen, yansıyan veya kırılan şiddet oranları ölçülür.

Kristale gelip kırınımına uğrayan dalgaların yapıcı girişim yapacakları doğrultular, Bragg Yasası ($2d \sin \theta = n\lambda$) ile belirlenir. Şekil 3.8'de gösterilen sistem için birbirine paralel iki düzlemden yansıyan X-ışınları arasındaki yol farkı ($CB + BD = 2d \sin \theta$) dalga boyunun tam katlarına eşitse yapıcı girişim olur. Buna göre, λ kullanılan x-ışınının dalgaboyu, θ ise örgü üzerine gelen X-ışını ile örgü yüzeyi arasındaki açı, d ise kristaldeki düzlemler arasındaki mesafe ve n ise yansıma derecesidir.



Şekil 3.7. Bragg yasası ile XRD deseni eldesinin şematik gösterimi

Saydam iletken oksit ailesinin bir üyesi olan ZnO hekzagonal kristal yapıya sahiptir (Şekil 2.13). Hekzagonal kristal yapı için düzlemler arası mesafe (d) ile hkl Miller indisleri

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.3)$$

ile hesaplanabilir.

Bu tez çalışmasında, ince filmlerin yapısal karakterizasyonunun belirlenmesinde X-ışını kırınım desen analizleri için RIGAKU RINT 2000 difraktometre, ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1,54056 \text{ \AA}$) kullanılmıştır. Elde edilen x-ışını kırınım desenleri ile düzlemler arası mesafe, örgü parametreleri (a ve c) ve kristal büyüklükleri hesaplanmıştır.

Hekzagonal-Wurtzite yapıdaki ZnO için ICDD 36-1451 veri tabanındaki (hkl) değerleri ve karşılık gelen 2θ değerleri kullanılarak hesaplanan düzlemler arası mesafe (d) değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hegzagonal-Wurtzite yapıdaki ZnO, X-ışını kırınım desenleri ve eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanan d değerleri.

(hkl)	$2\theta(^{\circ})$	$d(\text{Å})$
(100)	31,770	2,813
(002)	34,422	2,601
(101)	36,253	2,475
(102)	47,539	1,910
(110)	56,603	1,624
(103)	62,864	1,476

Düzlemler arası mesafenin belirlenmesinden sonra, λ kullanılan X-ışının dalgaboyu, β kırınım desenindeki piklerin yarı maksimum genişliği (Full Width Half at Maximum, FWHM) ve θ_B Bragg yansıma açısı olmak üzere Debye-Schreer formülü (Cullity, 1978),

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.4)$$

ile ifade edilir.

Bu ifade ile yapı içindeki taneciklerin büyüklükleri hesaplanabilir. Tanecik boyutunun büyümesi malzemede kristalleşmenin arttığı anlamına gelir.

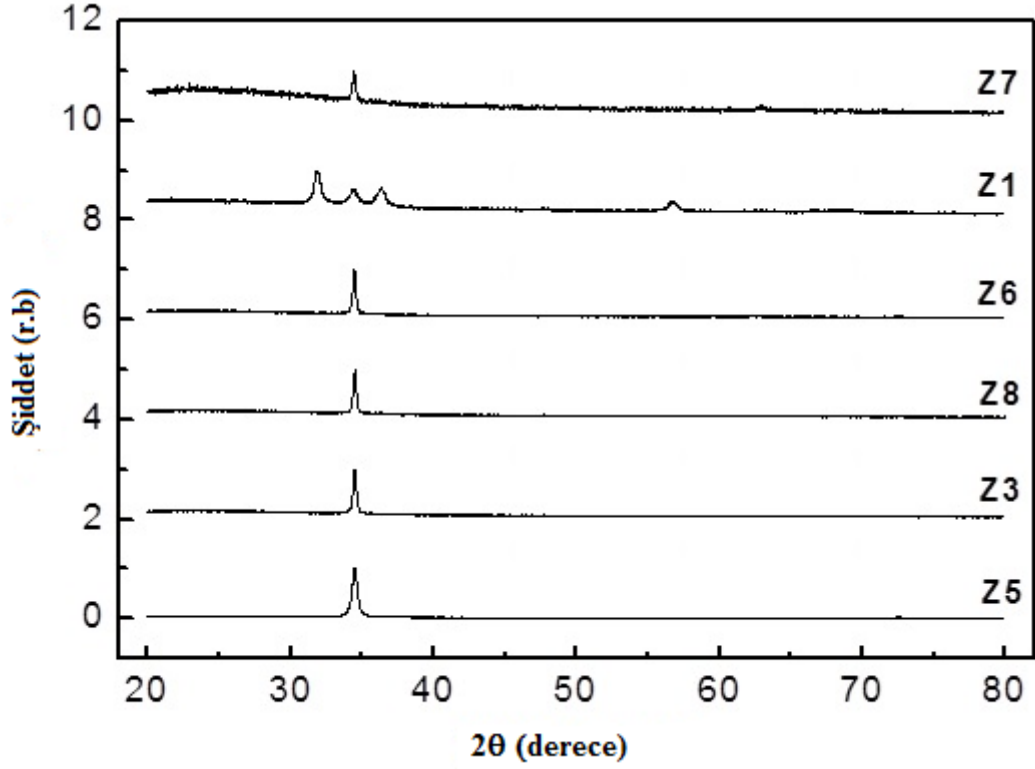
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

İlk olarak, UKP sisteminde farklı ön çözelti akış hızları için cam tabanlar üzerine biriktirilen ZnO ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri ve optik geçirgenlik spektrumları değerlendirilmiştir. Biriktirme sürecinde alttaş sıcaklığı 400 °C olarak seçilmiştir. Uygun hazırlama parametreleri belirlendikten sonra farklı molaritelerdeki (0,04 M, 0,08 M ve 0,1 M) ZAD içeren ön çözeltilerin p-tipindeki (100) yönelimli Si alttaşlar üzerine biriktirilmesi ile elde edilen heteroeklemlerin *I-V*, *C-V*, *C-T* ve *C-f* değişimleri incelenmiştir. Ek olarak, 0,1 M ZAD kullanılarak hazırlanan heteroeklemin bazı elektriksel özellikleri, benzer bir UKP sisteminde, (300 °C alttaş sıcaklığı ve 0,1 M ZAD) hazırlanan bir başka n-ZnO/p-Si heteroeklem ile karşılaştırılmıştır.

4.1. ZnO İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

Farklı ön çözelti akış hızları için elde edilen x-ışını kırınım desenleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Çok yüksek akış hızları için (akış hızı >5 ml/min) ZnO ince filmlerde (002) tercihli yönelimi gözlenememiştir. Bununla beraber çözelti akış hızının düşük değerleri için (akış hızı ~ 1,5 ml/min) ZnO filmlerde (002) tercihli yönelime sahip tek kristal benzeri polikristal bir yapı gözlenmiştir.

UKP tekniğinde esas olarak sıcak alttaş üzerine gelen damlacıkların kimyasal reaksiyon sonucunda yüzeye yapışmaları sayesinde ince film oluşumu sağlanır (Bilgin, 2003; Erarslan, 2010). Ancak çözelti akış hızına göre alttaş ile atomizer arasındaki mesafenin optimize edilmesi gerekir. Mesafe arttıkça damlacıkların alttaş yüzeyine ulaşması için taşıyıcı gazın basınç değeri ve alttaş sıcaklığını sabit tutmak için ısıtıcı gücü artırılmalıdır. Bu durum, ısıtıcı maliyetini artırır. Ayrıca çözelti akış hızının büyük olması, alttaş yüzeyinde sıcaklık dalgalanmalarına neden olur. Bu ise filmin yapısal özelliklerini etkiler. İnce filmlerin daha çok polikristal formunda olmasına neden olur. Tercihli yönelimler azalır. Bunun yerine düşük çözelti akış hızı ile hem sıcaklık dalgalanmaları en aza indirilir (± 1 , ± 2 , ± 5 ve ± 10 °C), hem de düşük güçlü ısıtıcılar ile kaliteli ince film malzemeler elde edilebilir. Eşitlik (3.4) ile verilen Debye-Schreer formülü ile hesaplanan kristalinite boyutları Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı ön çözelti akış hızları için hazırlanan ZnO ince film örneklerinin X-ışını kırınım desenleri

Çizelge 4.1. PUMA yardımı ile hesaplanan film kalınlıkları ve kristallinite (grain) boyutları.

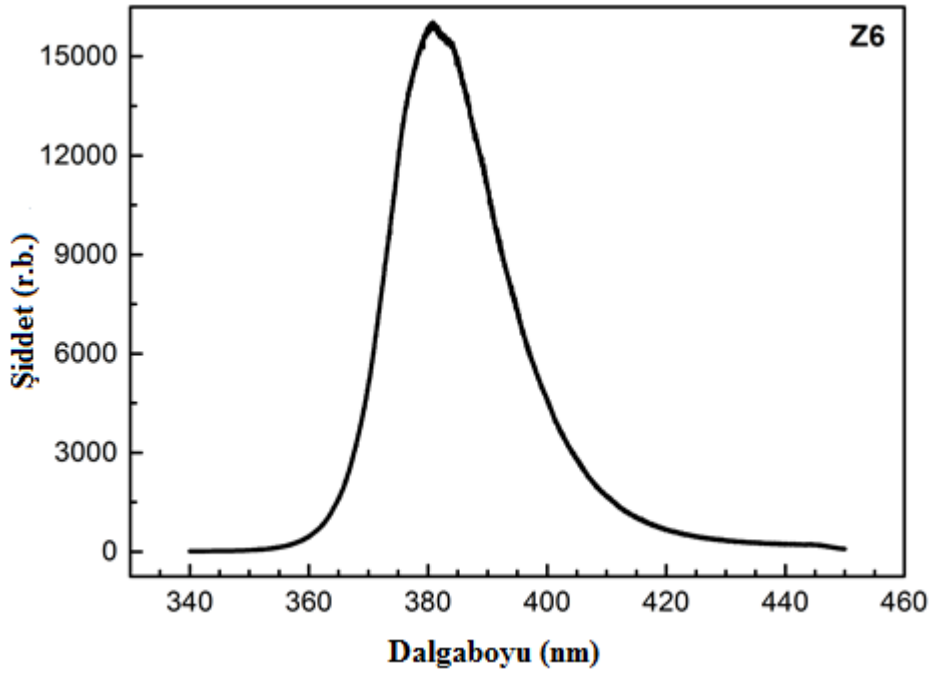
Örnek İsmi	Film kalınlığı (nm)	d(nm)
Z1	118	*
Z3	104	*
Z5	1750	25
Z6	278	43
Z7	130	42
Z8	560	44

* Amorf yapıda kırınım desenleri gözlemlendiği için kristallinite (grain) değerleri hesaplanamamıştır

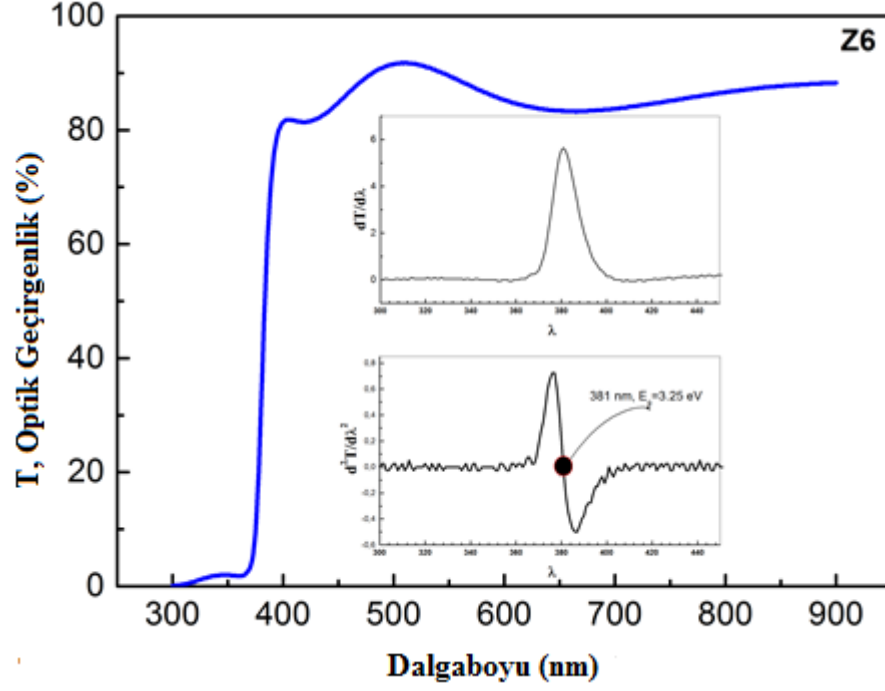
4.2. ZnO İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

Optik yöntemlerin geçerliliğini göstermek için yapısal olarak karakterize edilen kendi örnek grubumuzdan Z6 numaralı ince film örneğin fotoışıl (PL) spektrum Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Örnekler üzerine 325 nm dalgaboyuna sahip 100 mW gücündeki He-Cd lazer ışığı gönderilerek HORIBA Jobin-Yvon model monokromatör ve uygun detektör ile PL spektrumu elde edilmiştir. Spektrumda gözlenen pik değeri ile hesaplanan band aralığı ($E_g=3,25\text{eV}$) değeri literatür ile uyum içerisindedir (Erarslan, 2010; Ocak, 2012).

Şekil 4.3’de gösterilen optik geçirgenlik spektrumu ve $\frac{d^2T}{d\lambda^2}$ değişiminden yararlanılarak elde edilen band aralığı değeri ($E_g=3,25\text{eV}$), PL ölçümlerinden (Şekil 4.2) elde edilen değerler ile uyum içindedir.



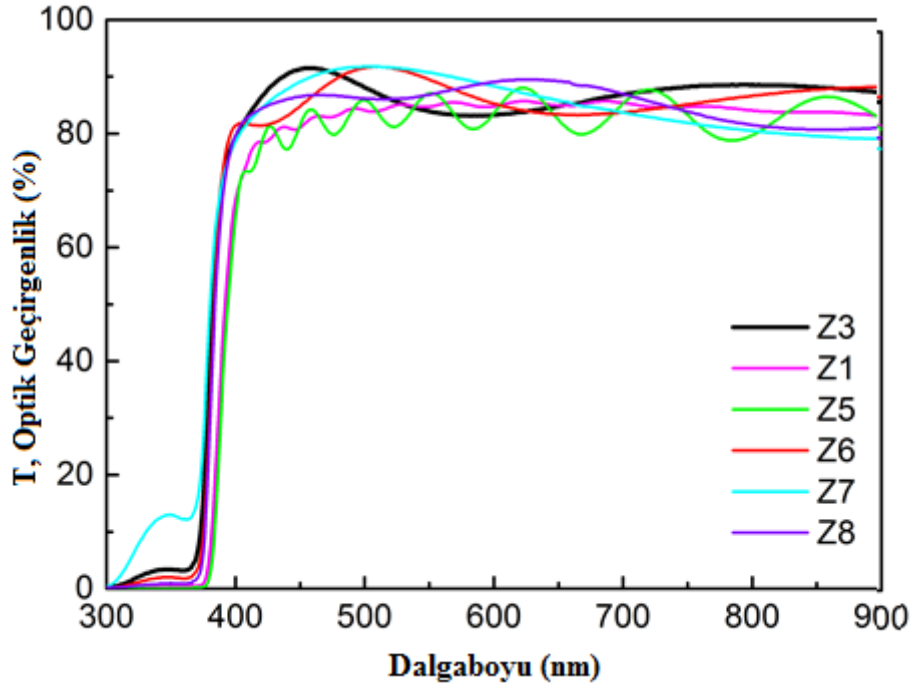
Şekil 4.2. Z6 olarak adlandırılan ZnO ince film ait PL spektrumu



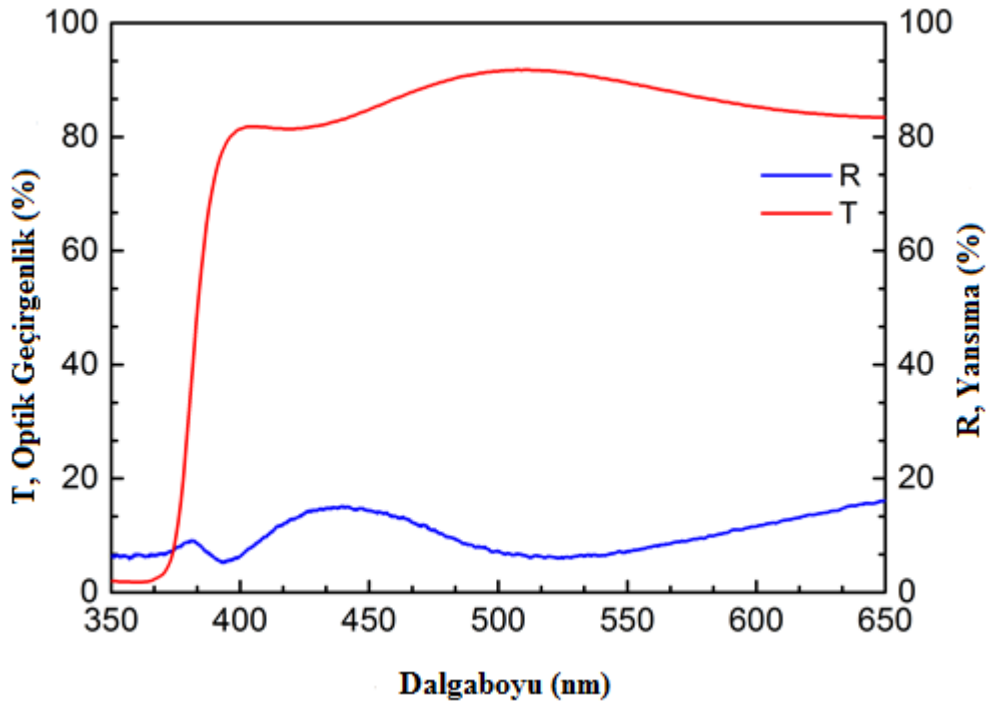
Şekil 4.3. Z6 örneğinin $T''(\lambda)$ değişimi ve optik band aralığının hesaplanması

Optik tepkilerde (optik yansıma ve optik geçirgenlik ölçümlerinde) film kalınlığına bağlı olarak girişim saçaklarının gözleendiği durumlarda Swanepoel (1983) ve Minkow (1989) tarafından geliştirilen yöntem, girişim saçaklarının gözlenmediği durumlarda ise alternatif iterasyon yöntemleri kullanılabilir (Birgin ve diğ., 1999; Güngör, 2003; Erarslan, 2010). Bu iteratif yöntemlerinde, ölçülen ve kuramsal optik geçirgenlik değerleri arasındaki fark, belirli bir kalınlık değeri için uygun n ve k değerleri ile minimize edilir. Bunun için Birgin ve diğ. (1999) tarafından PUMA tekniği geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında bu algoritmanın C++ programlama dilindeki kaynak kodu kullanılmıştır.

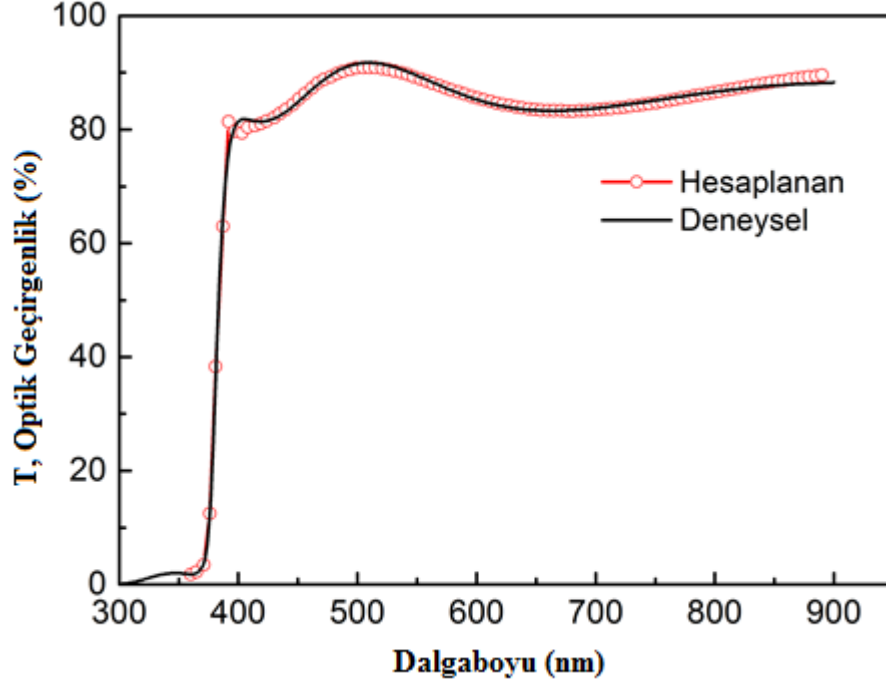
Şekil 4.4'te farklı çözelti akış hızları ile hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik spektrumu gösterilmiştir. Z6 örneğinin optik geçirgenlik ve yansıma spektrumu Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Beklendiği gibi optik geçirgenlik spektrumundaki maksimum geçirgenlik, optik yansıma spektrumundaki minimum noktaya karşı gelmektedir. Z6 örneği için PUMA programı yardımı ile hesaplanan optik geçirgenlik ve deneysel optik geçirgenlik spektrumları arasındaki uyum Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı ön çözelti akış hızları için elde edilen optik geçirgenlik spektrumları



Şekil 4.5. Z6 numaralı örneğe ait optik geçirgenlik ve yansımaya spektrumu



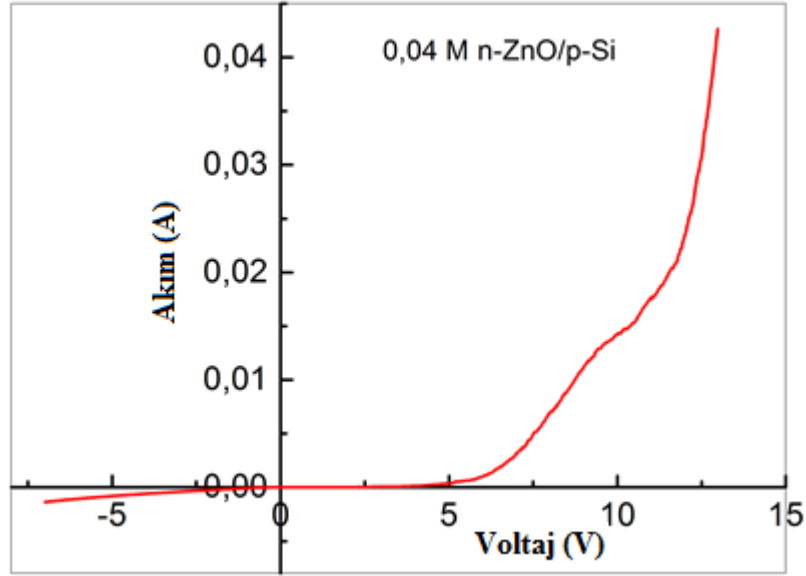
Şekil 4.6. Z6 numaralı örneğe ait hesaplanan ve deneysel optik geçirgenlik spektrumu

4.3. n-ZnO/ p-Si Eklemlerin Akım-Voltaj Karakterizasyonu

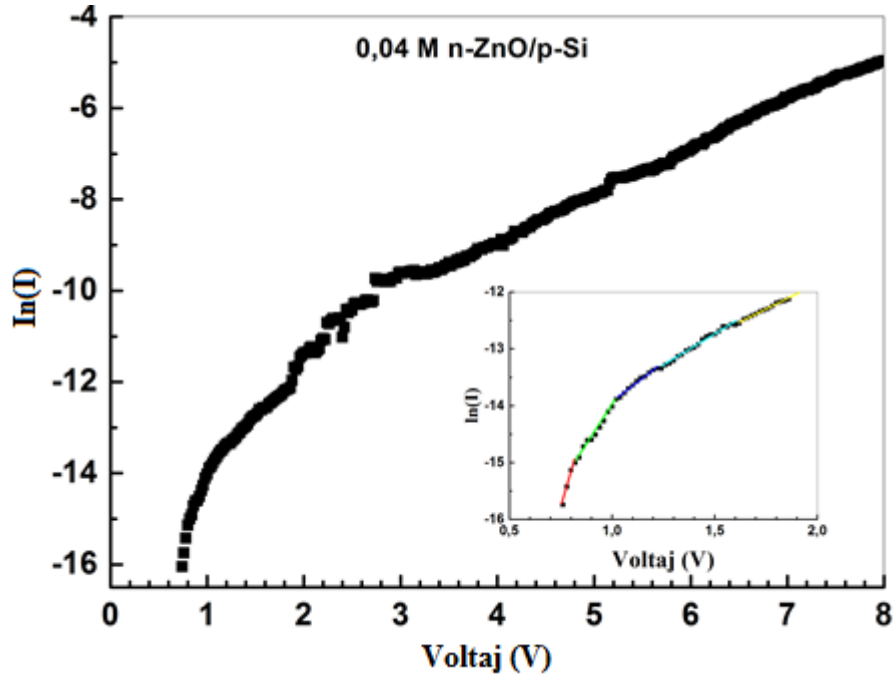
UKP sisteminde 0,1-1 Ωcm öz dirence sahip (100) yönelimli bor (B) katkılı p-tipi Si alttaş üzerine biriktirilen n-ZnO ile n-ZnO/p-Si heteroeklemler elde edildi. Üretici firma tarafından (MTI Corporation) belirtilen (Şekil 2.7) katkı yoğunluğunun öz direnç ile değişiminden yararlanarak hesaplanan alıcı atom konsantrasyonu (N_A) 3×10^{17} - 2×10^{16} $1/\text{cm}^3$ arasında değişmektedir. Gümüş boya ile örnek üzerinde oluşturulan elektiriksel kontaklar yardımı ile ters besleme ve ileri besleme bölgesinde I - V değişimi elde edilmiştir. Eklemlerin I - V değişimleri sıcaklığın fonksiyonu olarak Keithley 2400 model sourcemeter birim kullanılarak elde edilmiştir. Kapasite-frekans (C - f) değişimleri UT 612 model kapasitansmetre ile farklı frekans (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz ve 100 kHz) değerleri için elde edilmiş olup ve HIOKI 3532-50 model LRC metre ile 50 Hz-5 MHz aralığında sürekli olarak ölçülmüştür. Ayrıca, örneklerin C - V değişimleri 9268 DC besleme ünitesi ve HIOKI 3532-50 model LRC metre kullanılarak ölçülmüştür.

4.3.1. 0,04 M n-ZnO/p-Si Analizi

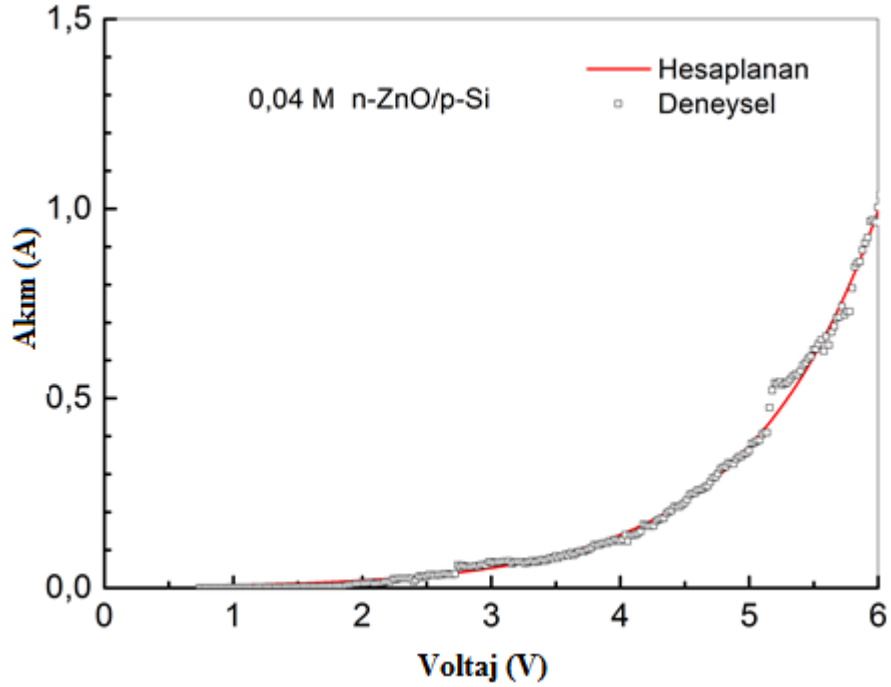
0,04 M ZAD içeren başlangıç ön çözeltisi 400 °C sabit alttaş sıcaklığındaki p-tipi Si (100) üzerine biriktirildikten sonra her iki yüzey üzerine gümüş boya kullanılarak elektriksel kontaklar hazırlandı. Akım-voltaj değişimi Şekil 4.7’de, $\ln(I)$ - V değişimi ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir. İdealite faktörünün hesaplanmasında akım-voltaj değişimi, Eşitlik (2.10) ile verilen forma uydurulmuş veya $\ln(I)$ - V değişimin de doğrusallık gösteren bölgeleri dikkate alarak parçalı doğrusal regresyon yapılır. Şekil 4.9’da Eşitlik (2.10) ile uyum içinde olan davranış, Şekil 4.9’da ise parçalı doğrusal regresyon işlemi gösterilmiştir. Elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için I - V değişimi



Şekil 4.8. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için $\ln(I)$ - V değişimi ve idealite faktörünün belirlendiği $\ln(I)$ - V değişimi

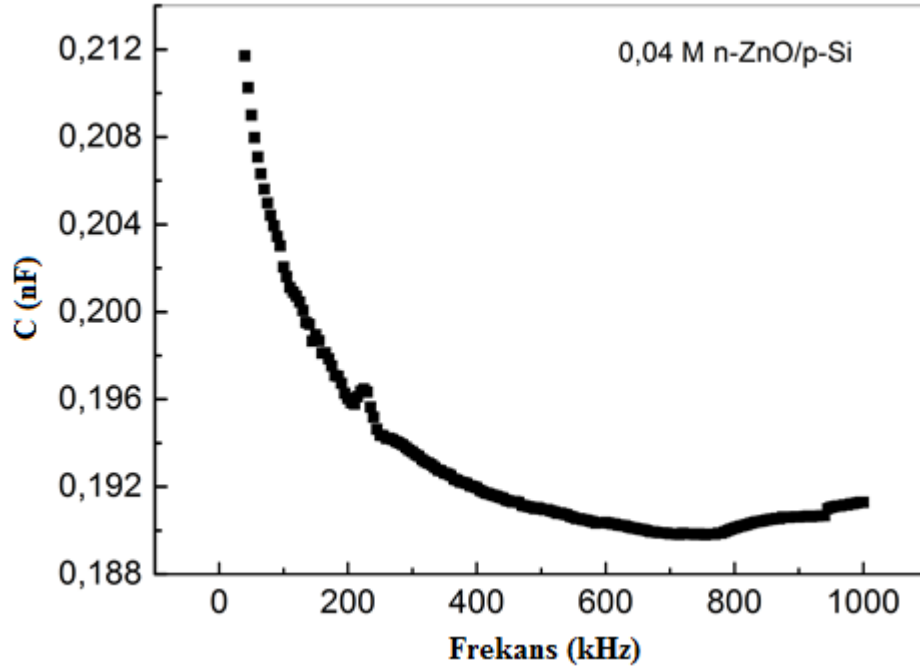


Şekil 4.9. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için Eşitlik (2.10) ile uyum içindeki I - V değişimi

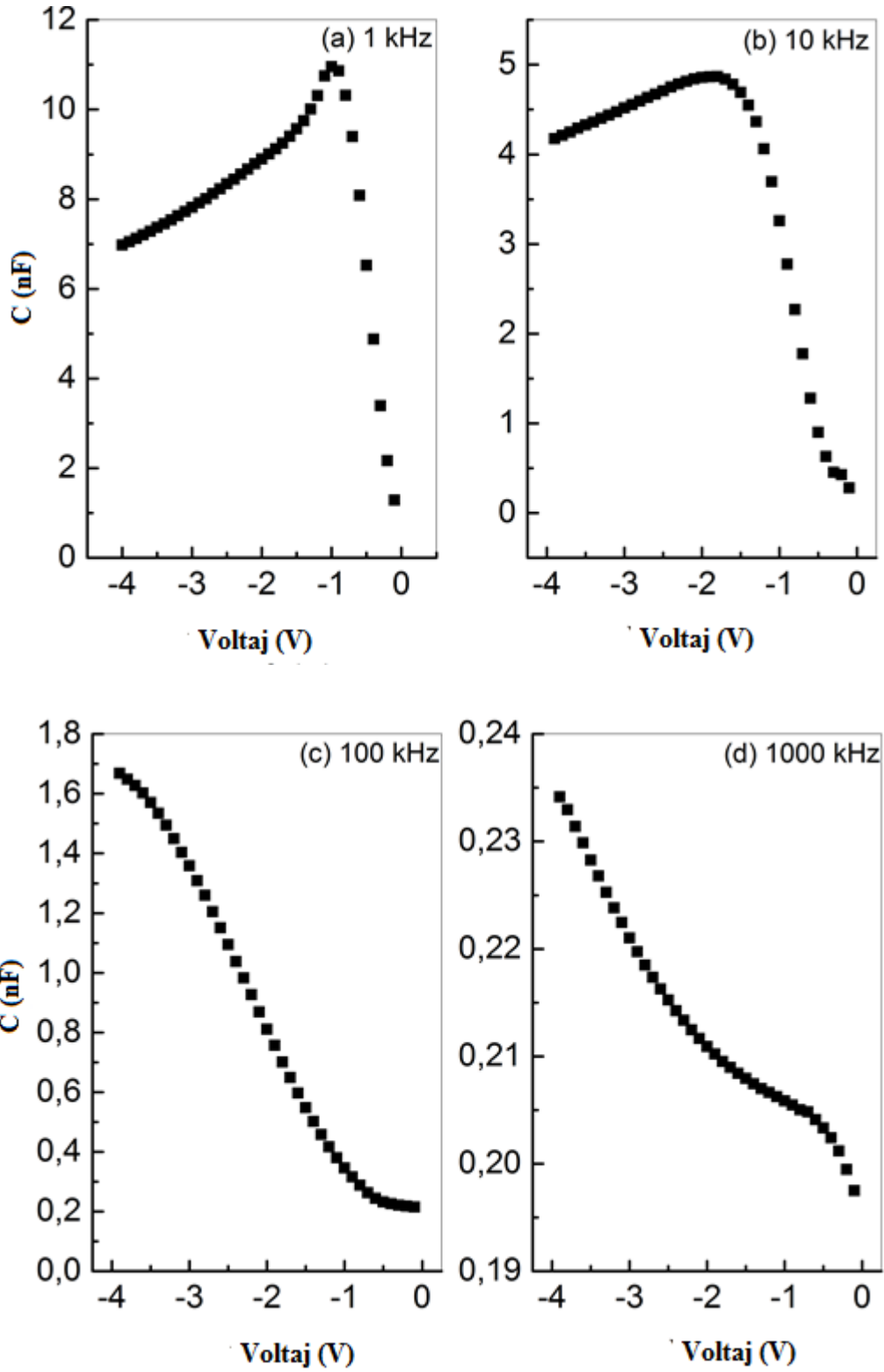
Çizelge 4.2. 0,04 M n-ZnO/p-Si örnek için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden sabit ve eğim, R ise korelasyon sabiti

Voltaj (V)	A	B	η	R
0,7-0,81	-27,29	15,20	1,41	0,999
0,81-1,10	-19,40	5,38	1,99	0,992
1,10-1,21	-16,76	2,83	2,31	0,993
1,21-1,60	-16,10	2,24	2,40	0,994
1,60-1,86	-15,25	1,69	2,53	0,996

Örneğin frekansa bağlı kapasitansının beklendiği gibi, artan frekans ile hızla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.10). Ters besleme voltajı ile kapasite değişimi 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz ve 1000 kHz için sırasıyla Şekil 4.11 (a-d)'de gösterilmiştir.

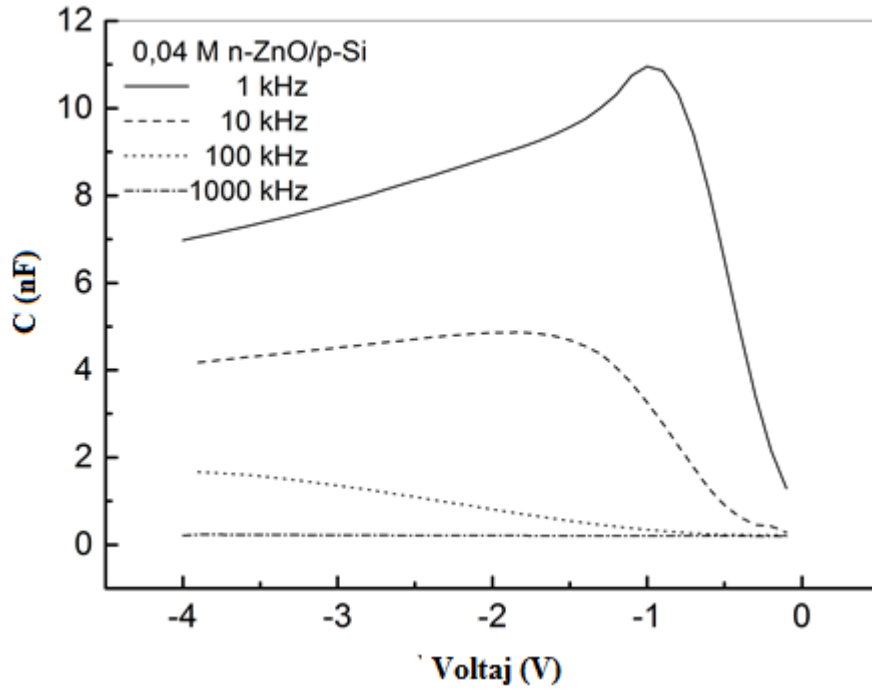


Şekil 4.10. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için frekansa bağlı kapasite değişimi



Şekil 4.11. 0,04 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için ters voltaj altında frekansa bağlı kapasitans değişimi 1 kHz (a), 10 kHz (b), 100 kHz (c) ve 1000 kHz (d)

Ters besleme voltajı altında farklı frekans değerleri için elde edilen kapasitans-voltaj değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Düşük frekanslarda (1 kHz) gözlenen tepe noktası artan frekans (10 kHz) ile düşük voltaj değerlerine doğru kaymaktadır. Ancak beklendiği gibi frekans arttıkça örneklerin kapasitans değişimi azalmakta ve C-V değişiminde pik gözlenmemektedir.



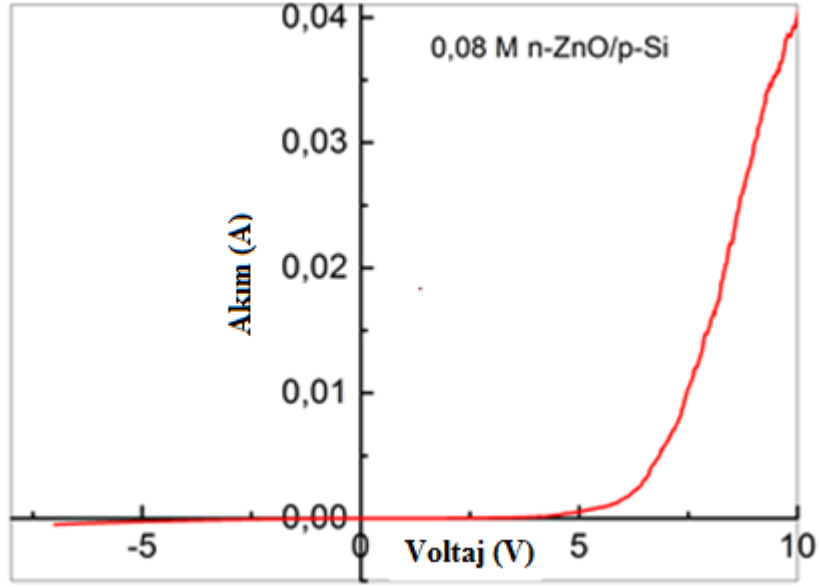
Şekil 4.12. Ters voltaj altında frekansa bağlı kapasite değişimi

4.3.2. 0,08 M n-ZnO/p-Si Analizi

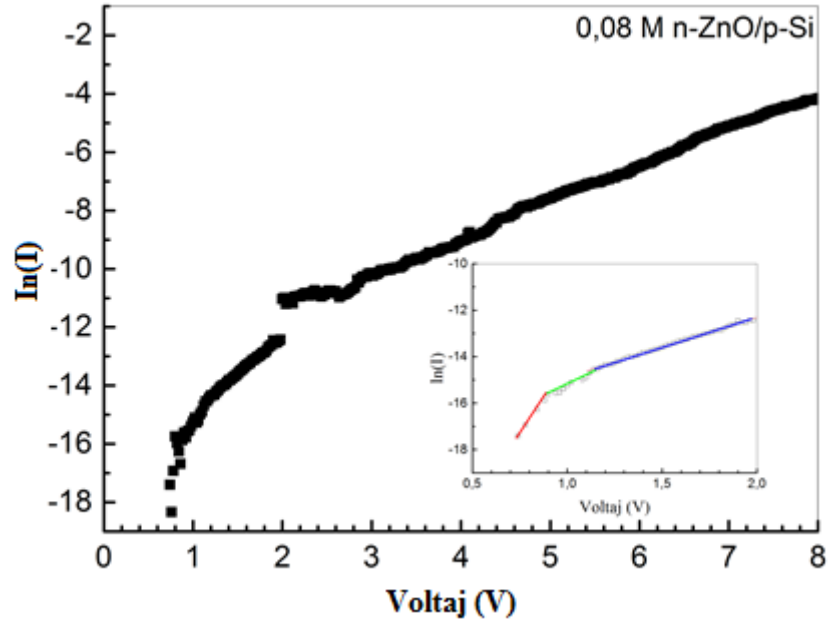
0,08 M ZAD içeren başlangıç ön çözeltisi 400 °C sabit alttaş sıcaklığındaki p-tipindeki Si (100) üzerine biriktirdikten sonra, her iki yüzey üzerine gümüş boya kullanılarak elektriksel kontaklar hazırlandı. Akım-voltaj değişimi Şekil 4.13’de, $\ln(I)$ -V değişimi ise Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

İdealite faktörünün hesaplanmasında akım-voltaj değişimi, eşitlik (2.10) ile verilen forma uydurulmuş veya $\ln(I)$ -V değişiminde doğrusallık gösteren bölgeleri dikkate alarak parçalı doğrusal regresyon yapılmıştır. Şekil 4.14’te parçalı doğrusal

regresyon işlemi gösterilmiştir. Elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.13. 0,08 M n-ZnO/p-Si örnek için I - V değişimi

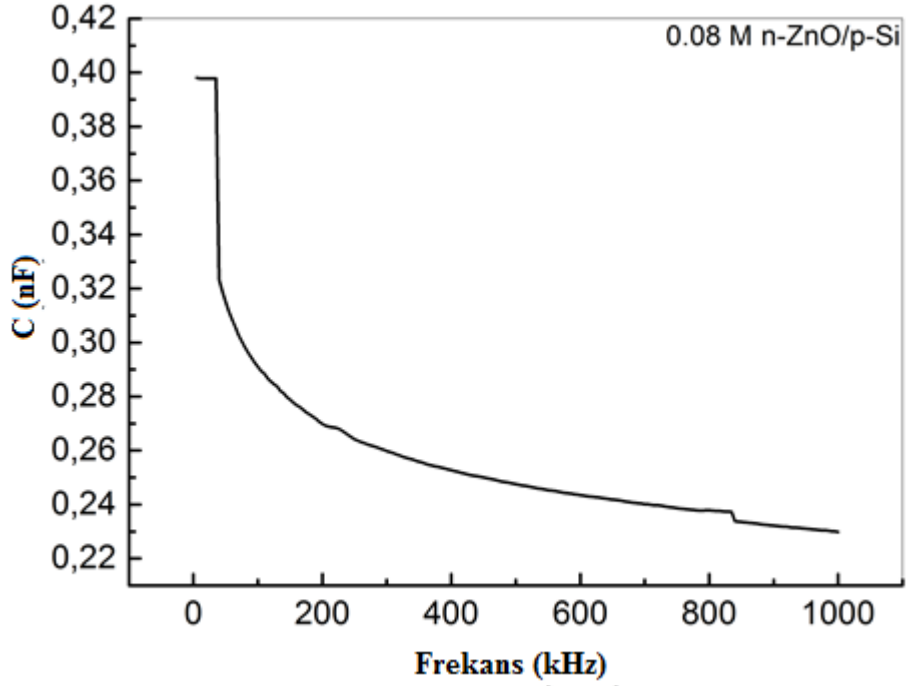


Şekil 4.14. 0,08 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için $\ln(I)$ - V değişimi ve idealite faktörünün belirlendiği $\ln(I)$ - V değişimi

Çizelge 4.3. 0,08 M n-ZnO/p-Si örnek için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden parametreler ($y=Ax+B$), R ise korelasyon sabiti

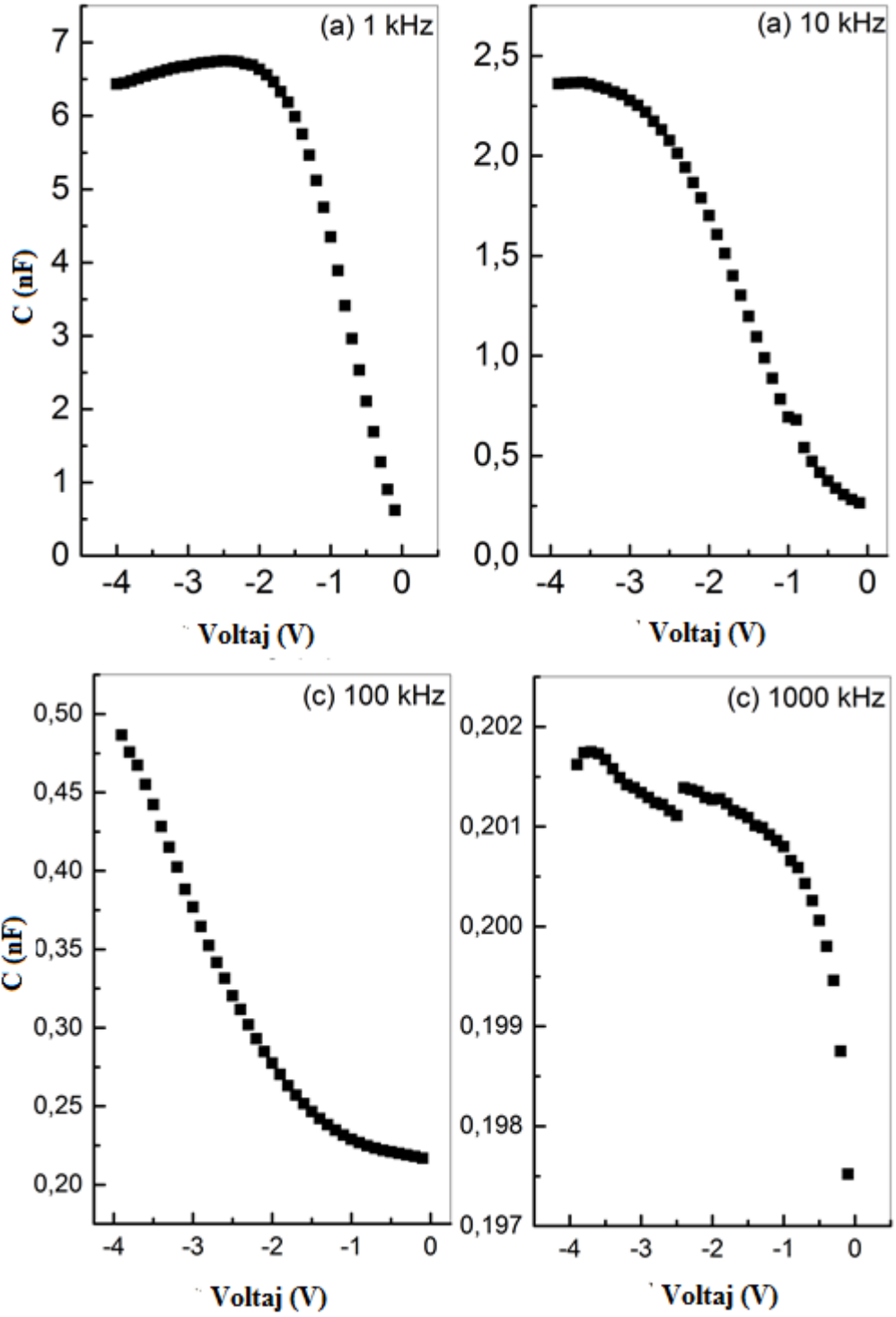
Voltaj (V)	A	B	η	R
0,70-0,90	-13,08	0,95	2,96	0,94
0,90-1,15	-19,74	4,48	1,96	0,98
1,15-2,00	-17,43	2,56	2,22	0,99

Örneğin frekansa bağlı kapasitansının değişimi beklendiği gibi artan frekans ile hızla azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.15). 0,08 M n-ZnO/p-Si örnek daha fazla ZAD içerdiğinden, başlangıç kapasitans değeri 0,04 M n-ZnO/p-Si örneğe göre daha yüksektir.

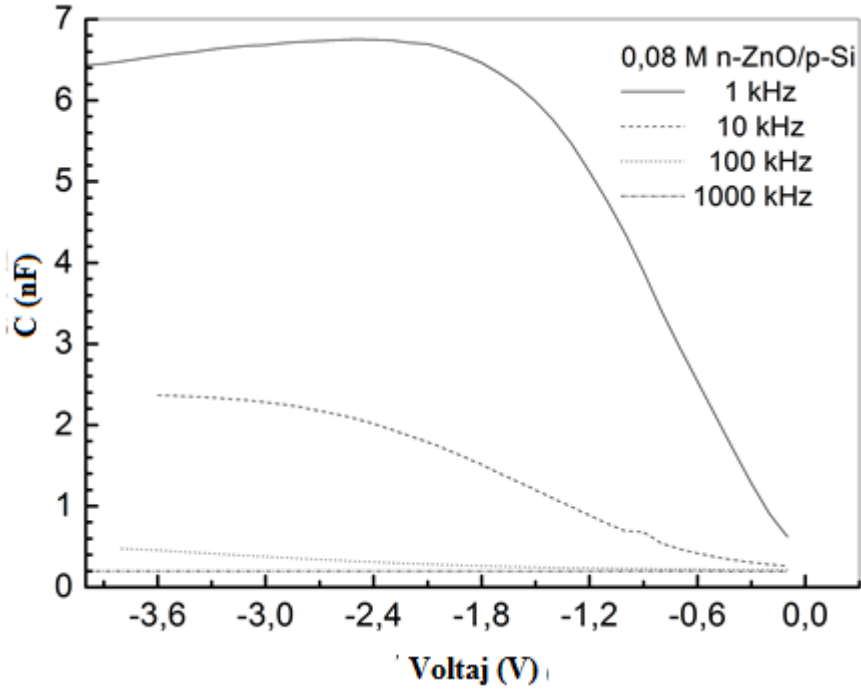


Şekil 4.15. 0,08 M n-ZnO/p-Si için frekansa bağlı kapasite değişimi

Ters besleme voltajı ile kapasite değişimi 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz ve 1000 kHz için sırasıyla Şekil 4.16 (a-d)'de gösterilmiştir. Ayrıca ters besleme voltajı altında farklı frekans değerleri için elde edilen kapasitans-voltaj değişimi Şekil 4.17'da gösterilmiştir. 0,04 M ZAD içeren örnekte dşuk frekanslarda (1 kHz) açıkça gözlenen tepe noktası 0,08 M örnekte gözlenememiştir. Ancak iki farklı eğime sahip bölge artan frekans (10 kHz) ile dşuk voltaj değerlerine doğru kaymaktadır. 0,04 M ZAD içeren örnekte olduğu gibi frekans arttıa örnekle rin kapasitans değişimi azalmakta ve $C-V$ değişiminde pik gözlenmemektedir.



Şekil 4.16. Ters voltaj altında frekansa bağlı kapasite değişimi 1 kHz (a), 10 kHz (b), 100 kHz (c) ve 1000 kHz (d)

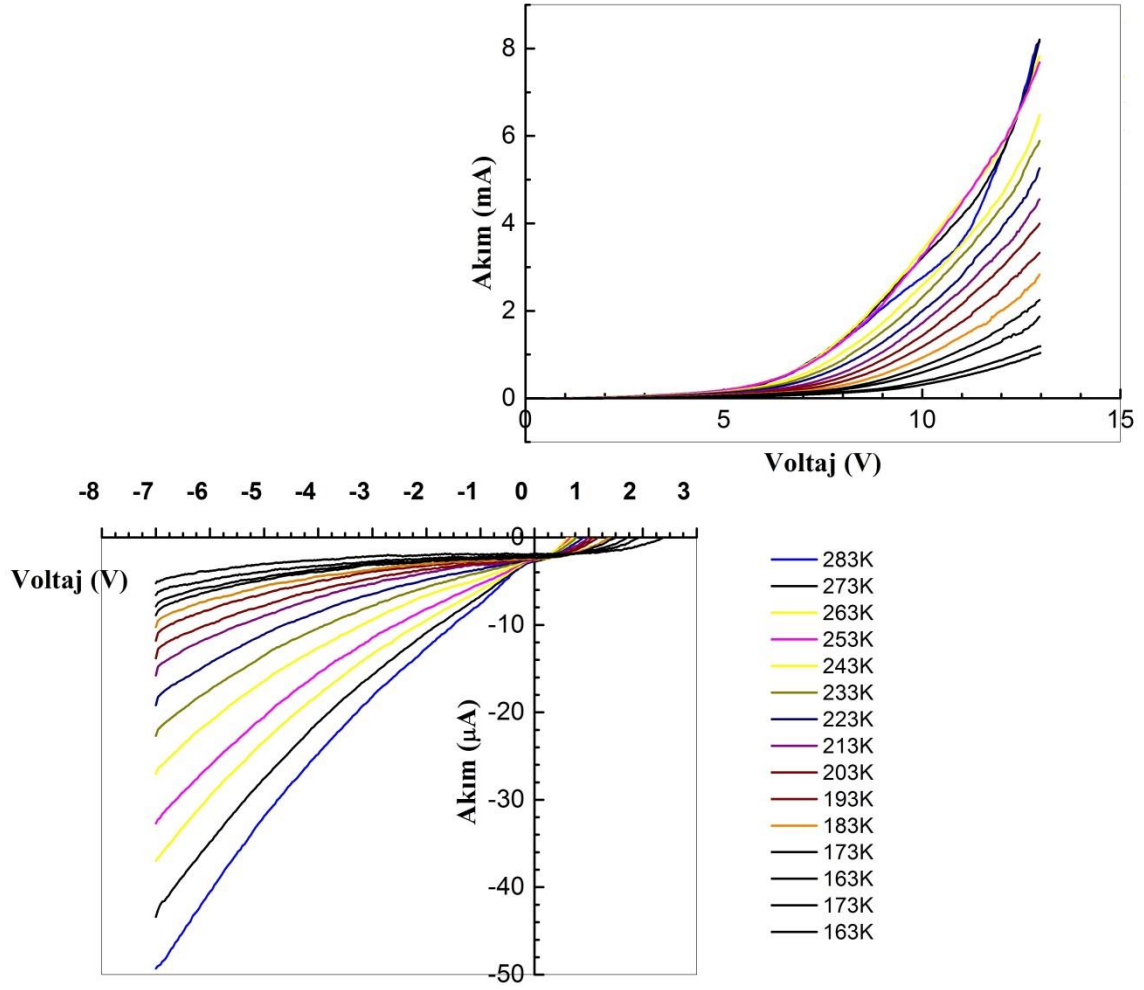


Şekil 4.17. Ters voltaj altında 0,08 M n-ZnO/p-Si örneğın frekansa bağlı kapasite değişimi

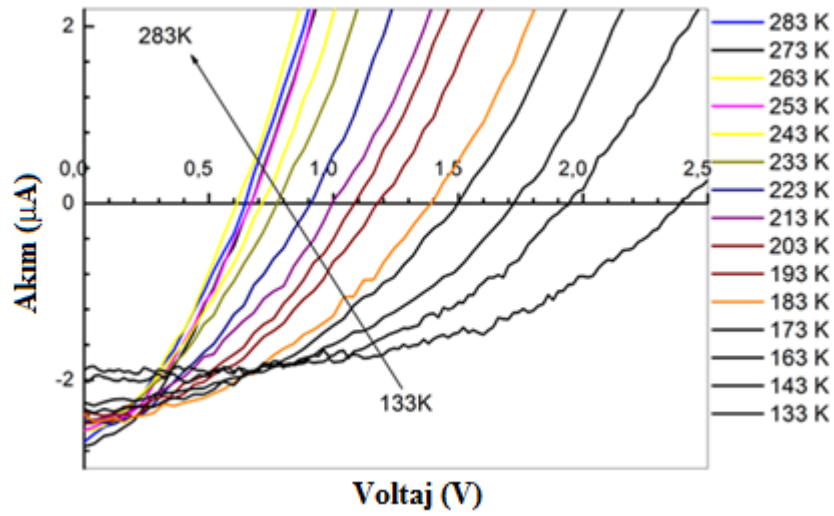
4.3.3. 0,1 M n-ZnO/p-Si Analizi

0,1 M ZAD içeren başlangıç ön özeltisi 400°C sabit alttaş sıcaklığındaki p-tipindeki Si (100) üzerine biriktirdikten sonra her iki yüzey üzerine gümüş boya kullanılarak elektriksel kontaklar hazırlandı. Sıcaklığa bağlı Akım-voltaj değişimi Şekil 4.18’de, V_{bi} değerinin sıcaklıkla değişimi ise Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

Sıcaklığa bağlı $I-V$ değişiminde akımın sıfırdan büyük olduğu voltaj V_{bi} değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır. 133 K için 2,4 V değeri, 283 K için yaklaşık 0,7 V değerine kadar azalmaktadır.

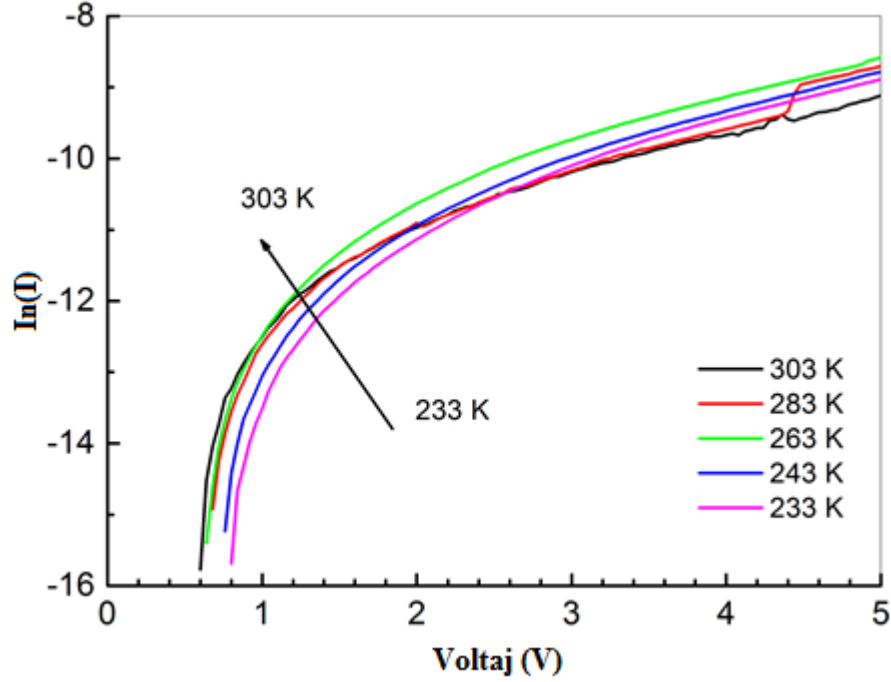


Şekil 4.18. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı *I-V* değişimi



Şekil 4.19. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı *I-V* değişimi V_{bi} değerlerinin gösterimi

Sıcaklığa bağlı $\ln(I)$ - V değişim Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Oda sıcaklığı civarında (303 K) $\ln(I)$ - V değişiminden yararlanılarak elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.

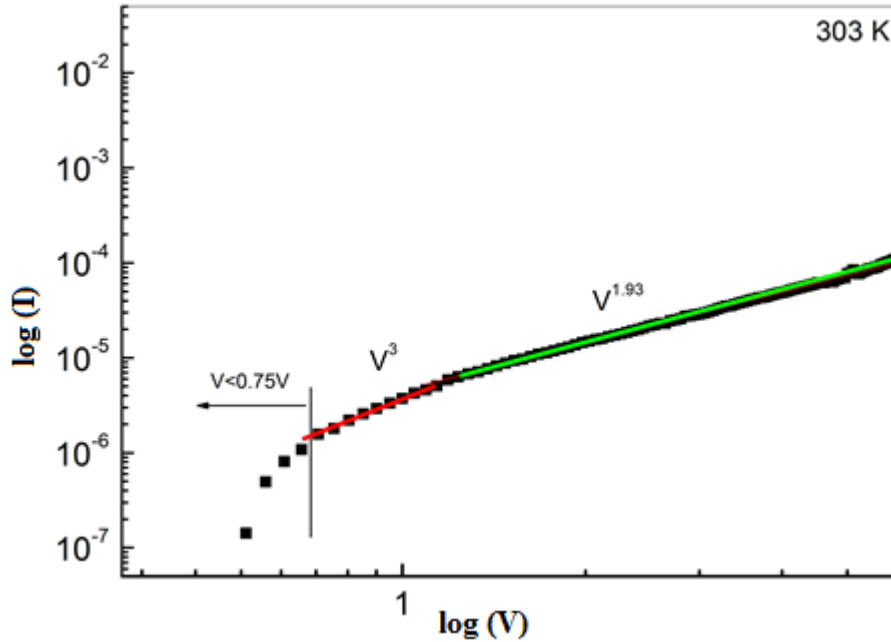


Şekil 4.20. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklemi için $\ln(I)$ - V grafiğinin sıcaklığa göre değişimi

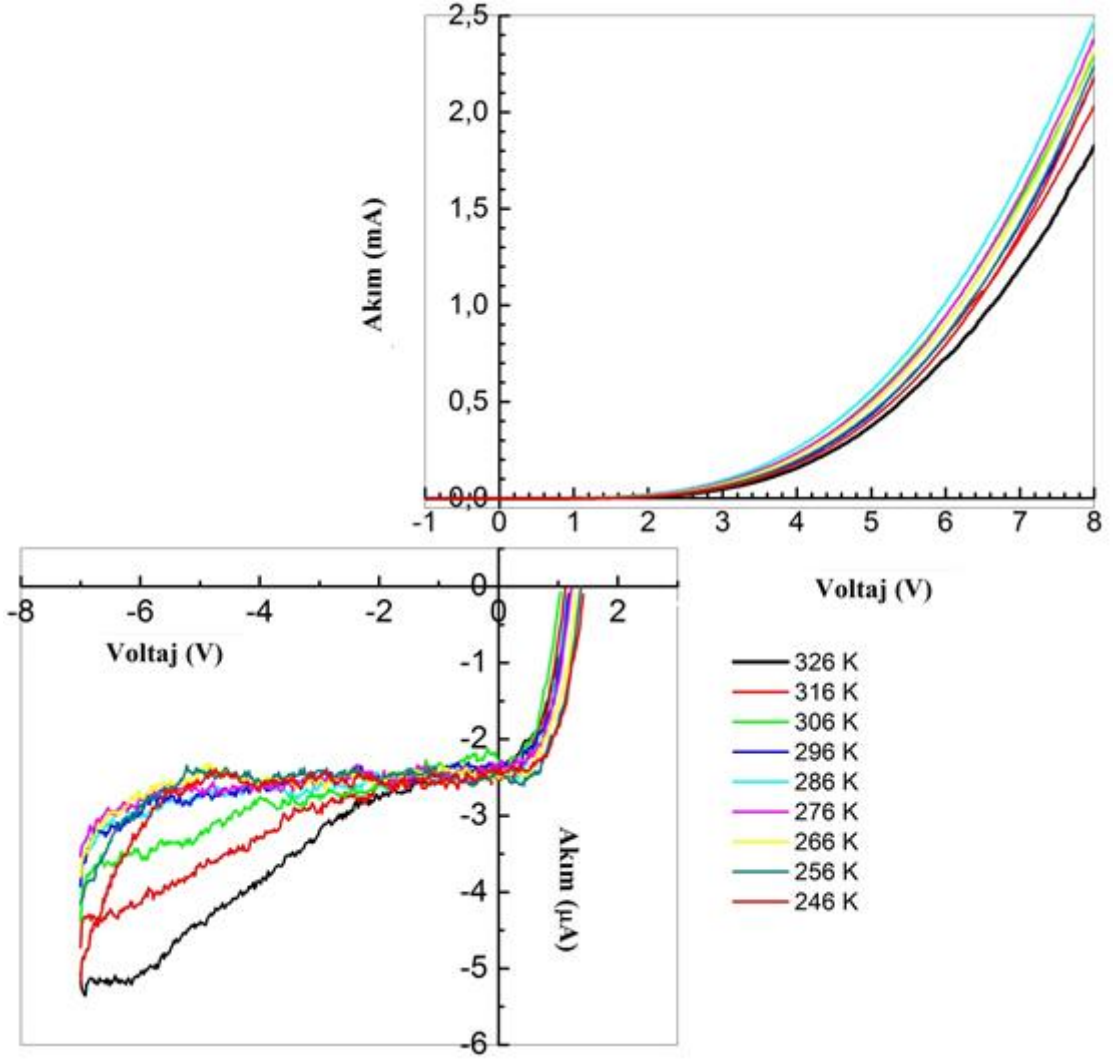
Çizelge 4.4. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklem için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden sabit ve eğim, R ise korelasyon sabiti

Voltaj (V)	A	B	η	R
0-0,70	-28,66	21,71	1,78	0,969
0,70-0,83	-17,37	5,15	7,511	0,981
0,83-1,27	-15,15	2,64	14,62	0,997
1,27-1,90	-13,40	1,25	31,00	0,997
1,90-2,78	-12,54	0,79	48,62	0,996
2,78-5,00	-11,75	0,52	74,07	0,997

Akım-voltaj arasında üstel bir ilişkinin varlığını test etmek için Şekil 4.21’de gösterilen $\log(I)$ - $\log(V)$ değişimi incelenmiştir. Buna göre 0,75 V besleme voltajından düşük voltaj değerlerinde akım-voltaj arasında üstel bir davranış gözlenmemiştir. Bunun yerine $0,75V < V < 1,15V$ arasında $I \propto V^3$ ve $1,15 V < V < 5 V$ arasında ise $I \propto V^{1,93}$ şeklinde değişim gözlenmiştir. I - V değişiminden elde edilen idealite faktörünün ($\eta > 4$) büyük olduğu durumlarda ideal davranışın dışında, yapısal kusurlardan, uzay yükü bölgesinde üretim-yeniden birleşme, bariyer tünellenmesi veya yüzey kirliliklerinden kaynaklanabilir. Termoyonik salınmadan kaynaklanan bu sapma uzay-yüküyle-sınırlı-akım (space charge limited current, SCLC) ile ilişkilendirilir. Genelde bu SCLC mekanizması geniş band aralıklı yarıiletkenlerde gözlenen bir durumdur; özellikle heteroeklemlerde örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan daha fazla kusur yoğunluklarına sahiptirler (Bilgin, 2003; Özyurt Kuş, 2010). K1 (karşılaştırma örneği) için elde edilen sıcaklığa bağlı I - V değişimi Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

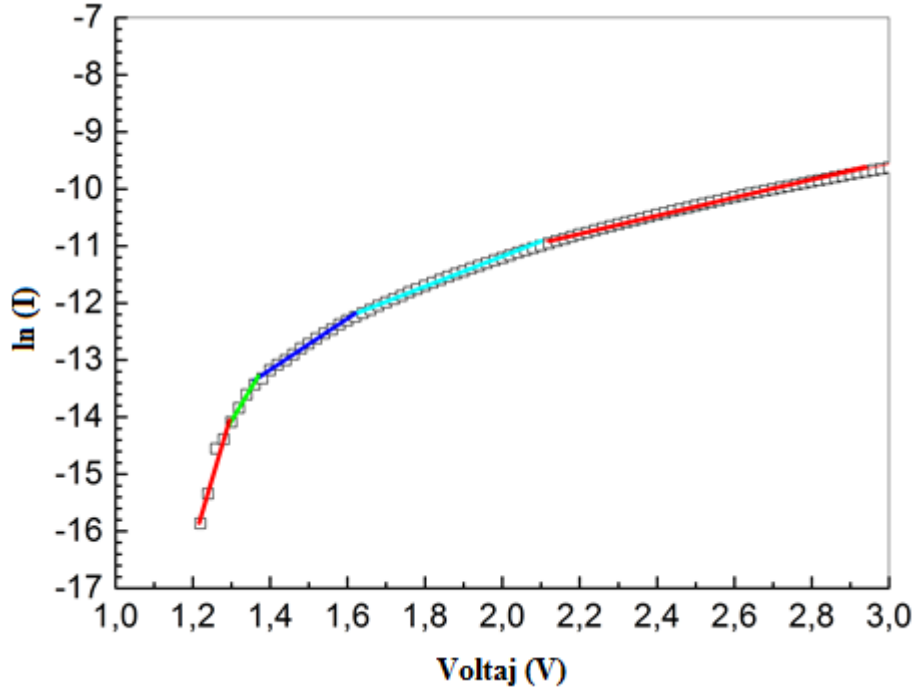


Şekil 4.21. 0,1 M n-ZnO/p-Si $\log(I)$ - $\log(V)$ değişimi



Şekil 4.22. K1 heteroekleminin sıcaklığa bağlı karanlık I - V değişimi

K1 heteroekleminin 300 K'de $\ln(I)$ - V değişim Şekil 4.23'te gösterilmiştir. $\ln(I)$ - V değişiminden yararlanılarak elde edilen idealite faktörleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.23. K1 heteroekleminin $\ln(I)$ - V değişimi

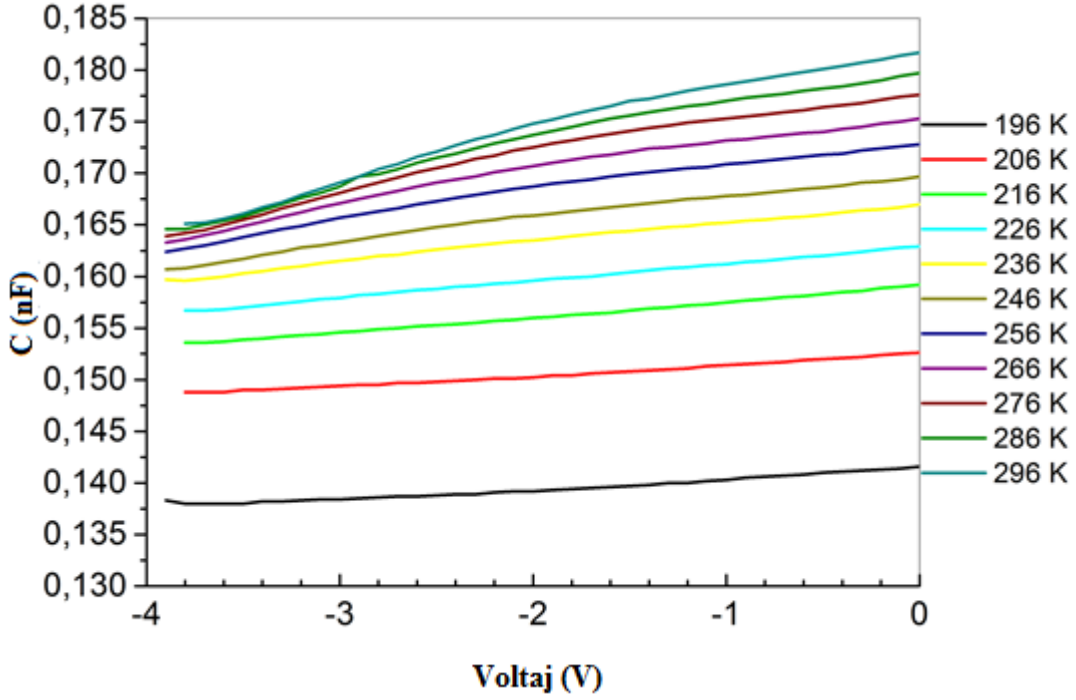
Çizelge 4.5. K1 heteroeklemi için Eşitlik (2.10) yardımı ile hesaplanan idealite faktörü (η). A, B doğrusal değişimi ifade eden parametreler ($y=Ax+B$), R ise korelasyon sabiti

Voltaj (V)	A	B	n	R
1,22-1,28	-47,51	25,98	1,48	0,974
1,28-1,35	-28,38	11,01	3,50	0,997
1,35-1,64	-19,57	4,56	8,44	0,997
1,64-2,12	-16,37	2,58	14,89	0,997
2,12-3,00	-14,09	1,51	25,47	0,997

4.4. n-ZnO/p-Si Eklemlerin Kapasitans-Voltaj Karakterizasyonu

Ayrıntıları Ek 1’de verilen deney sistemi kullanılarak benzer çalışmalarda bulunan bir başka araştırma grubuna ait benzer yapıdaki n-ZnO/p-Si heteroeklem (K1 heteroeklemi) için sıcaklığa bağlı Kapasitans-Voltaj (C - V) değişimleri Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Artan sıcaklıkla beraber kapasite değerlerinde artış gözlenmektedir. Düşük sıcaklıklarda ($<200K$) C - V değişimi hemen hemen sabit iken artan sıcaklıkla

beraber artmakta ve oda sıcaklığına yakın değerlerde iki eğimli bir davranış sergilemektedir.

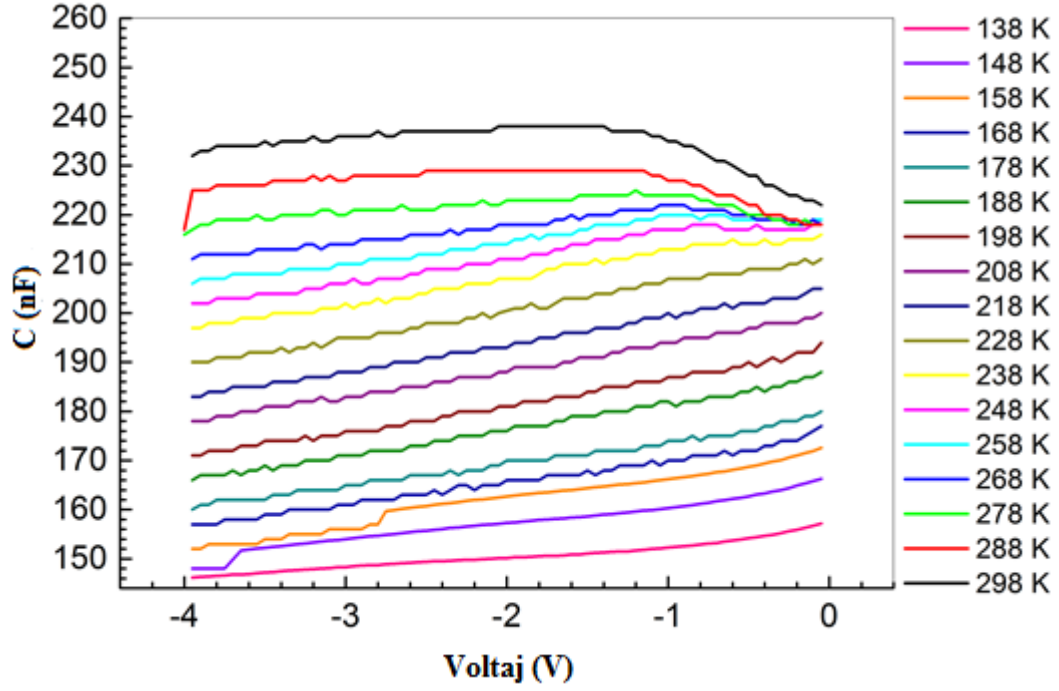


Şekil 4.24. n-ZnO/p-Si heteroeklem (K1) için sıcaklığa bağlı C-V değişimi

K1 (Şekil 4.24) ve tezde kullanılan 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklem (Şekil 4.25) karşılaştırıldığında, ters voltaj altında sıcaklığa bağlı kapasite değişimlerinde farklı davranış gözlenmektedir. K1 örneği için artan sıcaklıkla farklı eğimli ama artan kapasitans değişimi gözleniyorken, kendi örneğimiz için belirli bir sıcaklığa kadar ($T < 238$ K) kapasitans değerinde bir artış, gösterirken daha yüksek sıcaklıklarda bir maksimum ve sonrasında ise bir azalış gözlenmektedir. Bu dönüm noktası, artan sıcaklıkla daha düşük ters voltaj değerlerine doğru kaymaktadır.

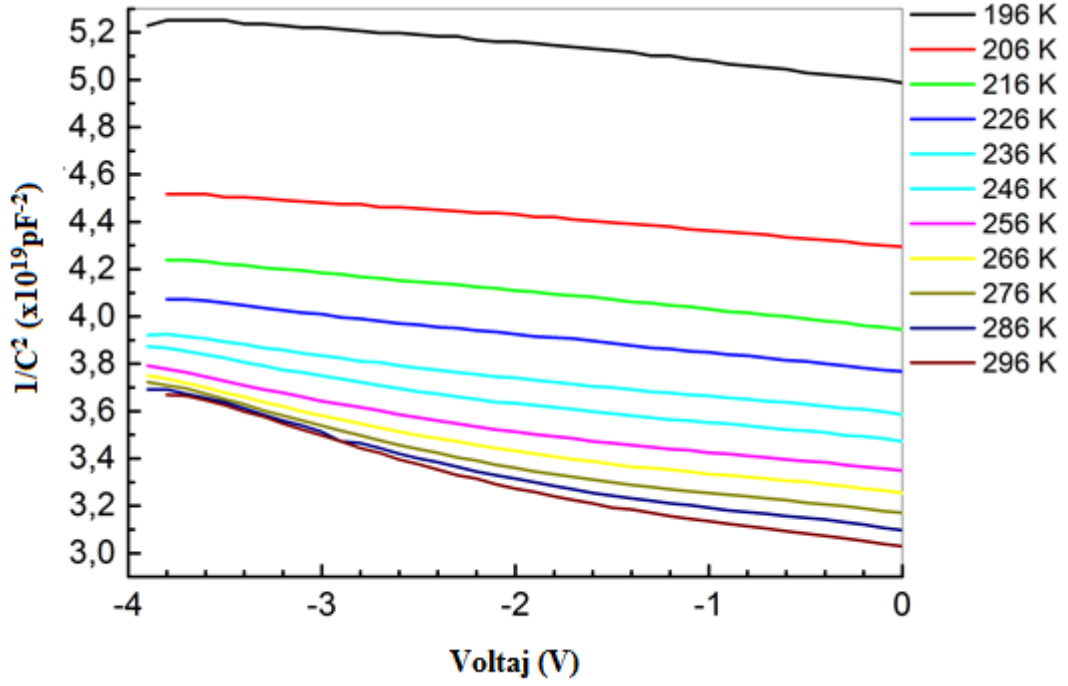
Ticari olarak üretilen 1N serisi diyotlardan 1N4001 için C-V değişimi Ek1'de gösterilmiştir. Diyot kapasitansının ters besleme voltajı altında frekans tepkisi üretici verileri ile uyum içindedir. $1/C^2-V$ değişiminden yararlanılarak V_{bi} değeri de elde edilmiştir. Yöntemin uygulanması üzerine ilgili bu tecrübeye rağmen tez çalışmasına konu olan örneklerin $1/C^2-V$ değişimlerinin incelenmesinde uygulamada zorluk

bulunmaktadır. Bunun sebebi, ters besleme voltajı ile kapasitansın değişim fonksiyonundaki farklılıktır.

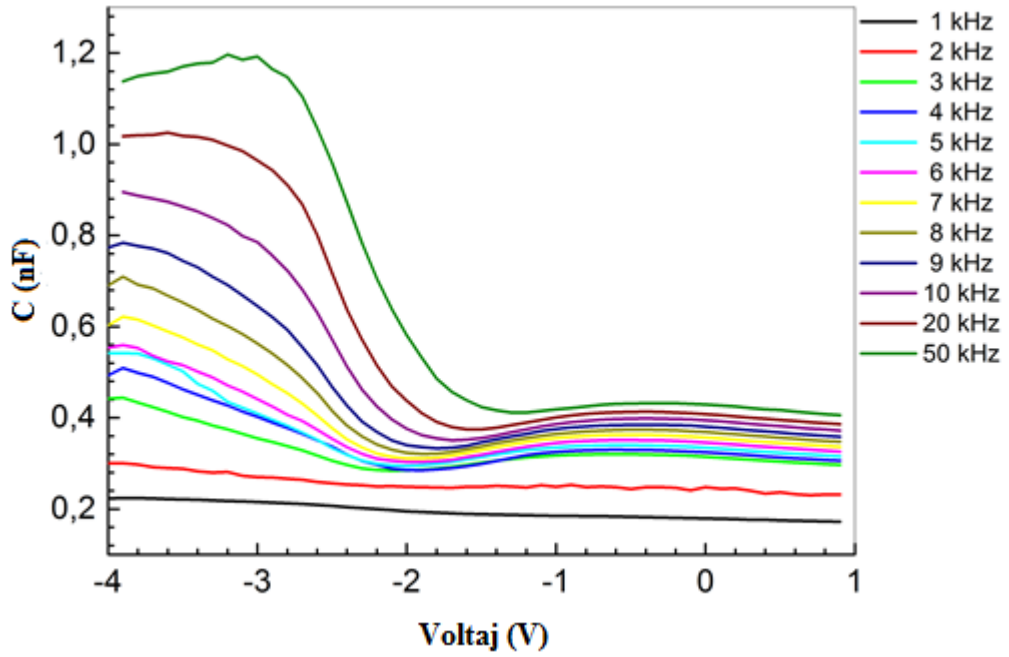


Şekil 4.25. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklemin sıcaklığa bağlı C - V değişimi

0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklemine ait I/C^2 - V değişimi Şekil 4.26'da gösterilmiştir. [-4,1] V aralığındaki C - V değişiminde artan negatif besleme voltajı ile azalan kapasitans değerleri (Şekil 4.27) ZnO'nun n-tipi katkılı olduğunu göstermektedir. Benzer bir yargı Özyurt Kuş (2010) tarafından p-tipi Si altaş üzerine ZnO nano parçacıklar biriktirilerek elde edilen heteroeklem için de gözlenmiştir.



Şekil 4.26. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklemine sıcaklığa bağlı $1/C^2$ -V değişimi

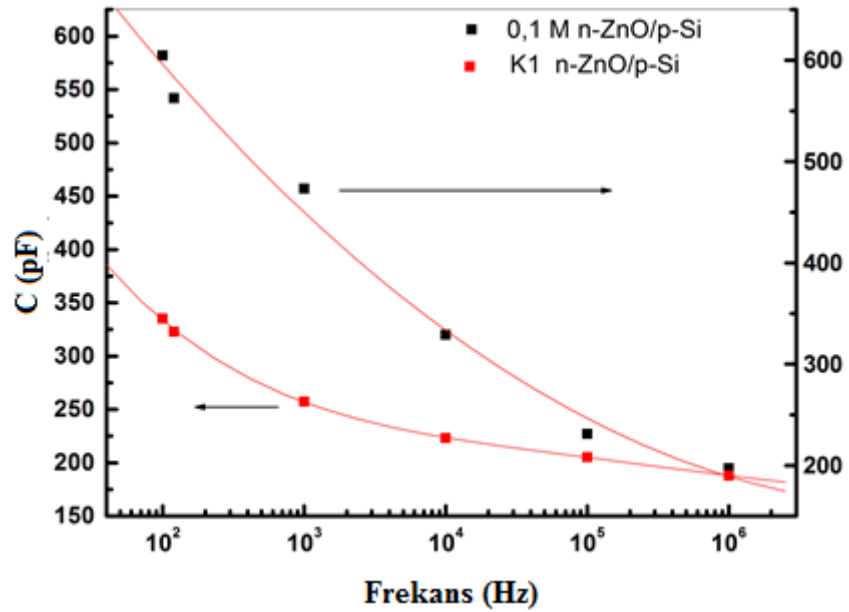


Şekil 4.27. 0,1 M n-ZnO/p-Si eklem için ters besleme voltajı ile kapasite değişimi

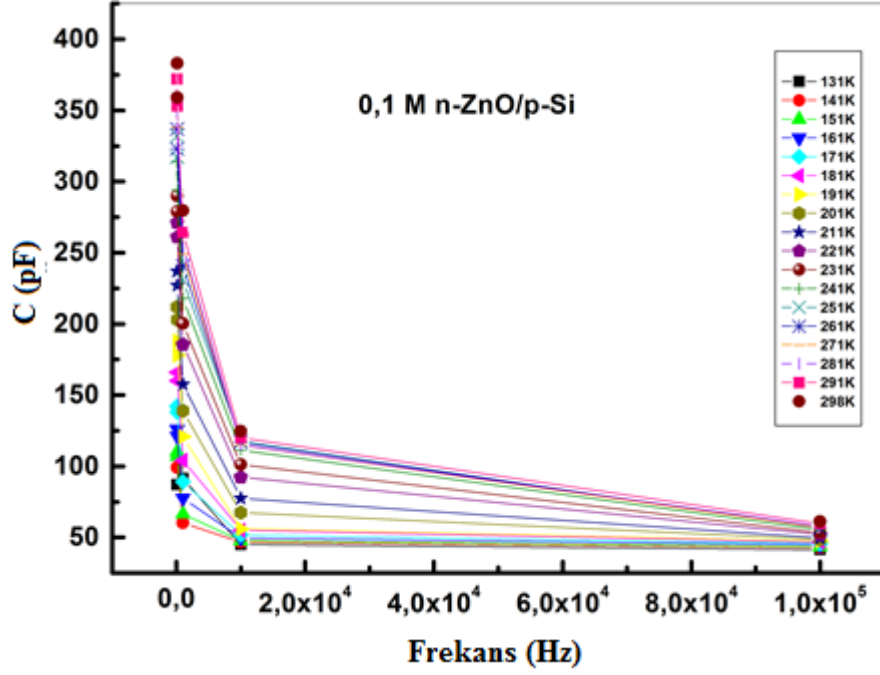
4.5. n-ZnO/p-Si Heteroeklemin Kapasitans-Frekans ($C-f$) Belirtkenleri

Kapasitans-frekans ölçümleri iki grupta incelenmiştir: İlk olarak sabit sıcaklıkta $C-f$ değişimleri sonrasında ise sabit f için sıcaklığın fonksiyonu olarak $C-T$ değişimleri elde edilmiştir.

UT 612 model kapasitansmetre ile 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz ve 100 kHz frekans değeri için 0,1 M ZAD içeren K1 eklemi ile tez çalışmasında üretilen eklemeye ait Kapasitans-Frekans ($C-f$) değişimleri Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Düşük frekans değerlerinde kendi yapım eklemin kapasite değeri daha yüksek olmasına rağmen, artan frekans ile birlikte aradaki fark azalmakta ve yüksek frekans değerlerinde değerler eşitlenmektedir.



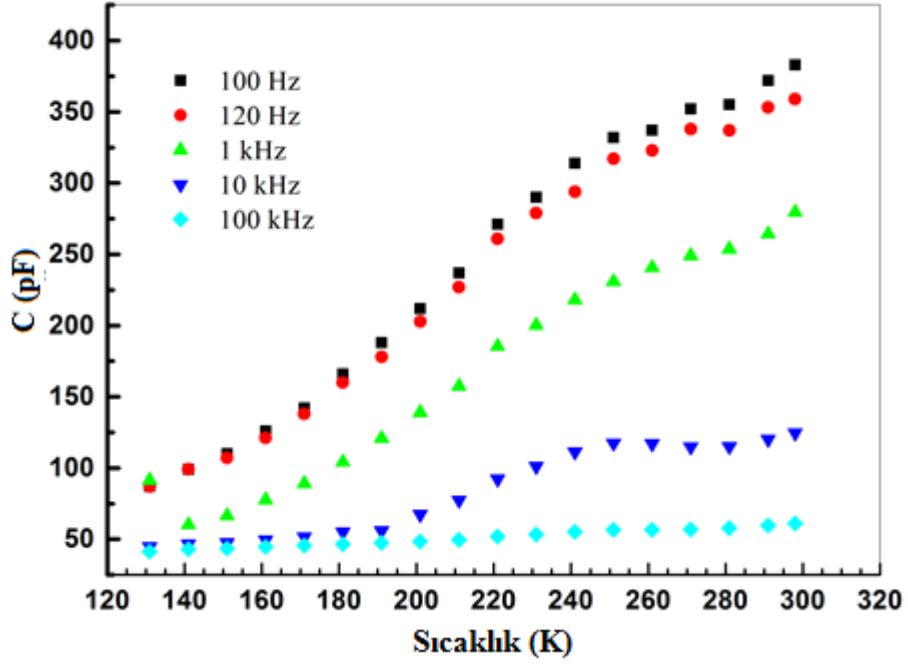
Şekil 4.28. 0,1 M ZAD içeren K1 ve tezde kullanılan heteroeklem için $C-f$ değişimi (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz ve 1 MHz)



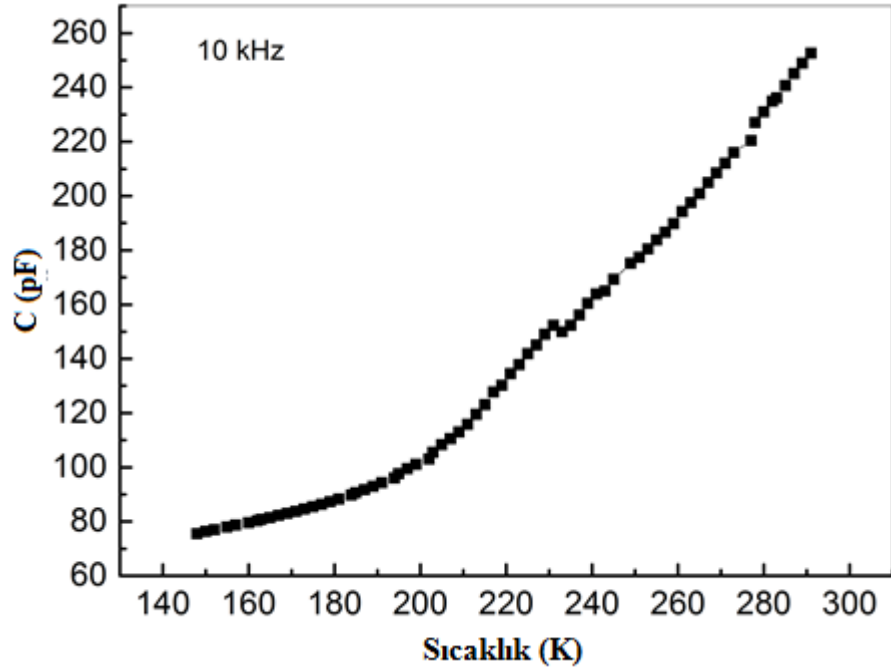
Şekil 4.29. 0,1 M ZAD içeren tezde üretilen heteroeklem için sıcaklığa bağlı $C-f$ değişimi

0,1 M ZAD içeren tezde üretilen heteroeklem için sıcaklığa bağlı $C-f$ değişimi Şekil 4. 29'da gösterilmiştir. Beklendiği gibi artan frekans ile kapasitans değerinde hızlı bir azalma gözlenmiştir. Aynı zamanda artan sıcaklık ile kapasitans değeri daha yüksek değerlere doğru gitmektedir. Bu ise ısıl etki ile taşıyıcı konsantrasyonun daki artış şeklinde açıklanabilir.

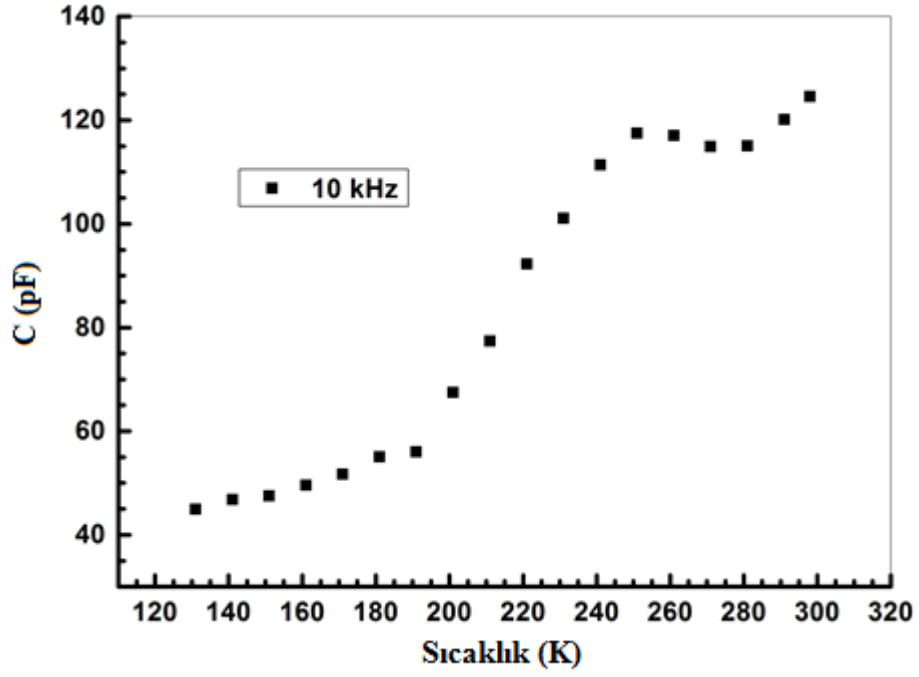
0,1 M ZAD içeren tezde üretilen heteroeklem için sıcaklığa bağlı kapasitans değişimi farklı frekans değerleri için Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Benzer yapıda olan K1 eklemi ile 0,1 M ZAD içeren tezde üretilen heteroeklem arasında bir karşılaştırma yapabilmek için sıcaklığa bağlı kapasite değişimleri Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Diğer fiziksel ölçümlerde olduğu gibi K1 eklemi ile 0,1 M ZAD içeren eklem arasında belirgin bir fark vardır. Öyle ki artan sıcaklıkla K1 ekleminin C değişiminde bir omuz bölgesi gözlenemez iken tezdeki örneğimizde 240 K sıcaklık değeri civarında tepe değeri olan bir davranış gözlenmektedir.



Şekil 4.30. 0,1 M n-ZnO/p-Si için frekansa bağlı C - T değişimi

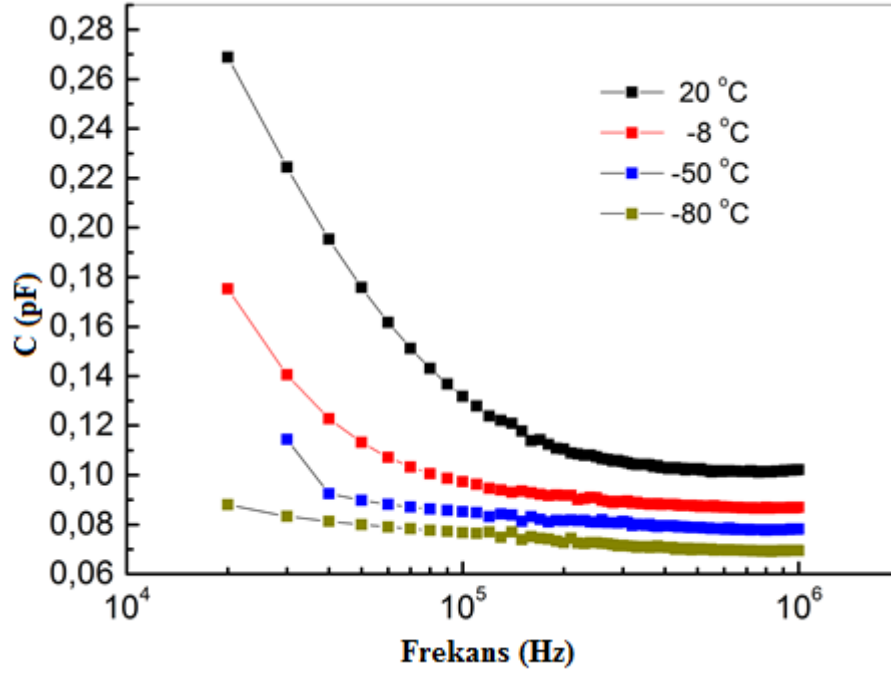


Şekil 4.31. K1 eklemının sıcaklığa bağlı kapasite (C - T) değişimi



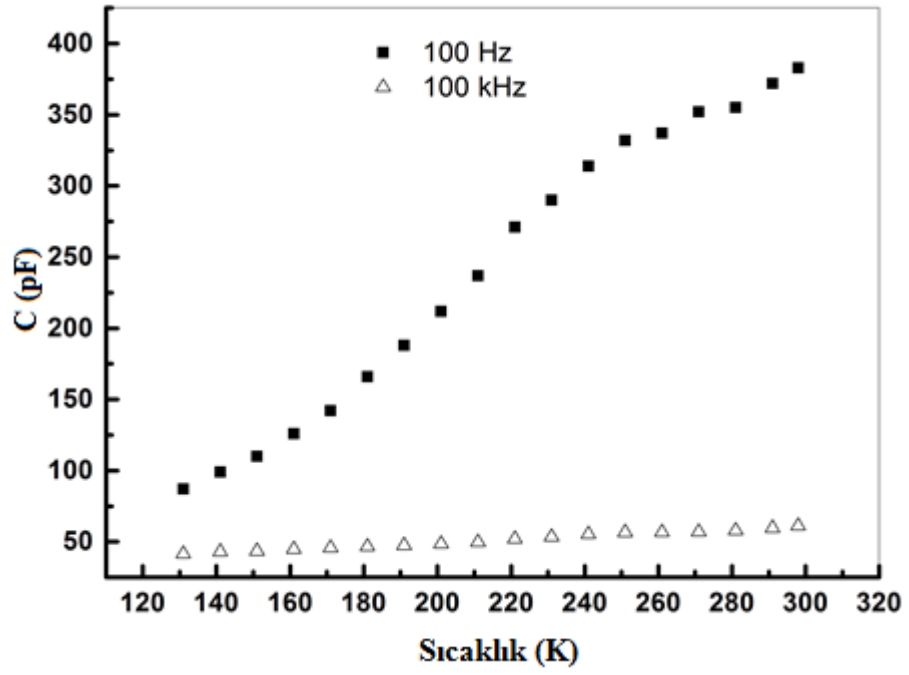
Şekil 4.32. 0,1 M n-ZnO/p-Si için sıcaklığa bağlı kapasite ($C-T$) değişimi

Bununla beraber tez sürecinde Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen 173 NAP-13 numaralı projeden temin edilen ve HIOKI 3532-50 model LRC metre ile 20 kHz-1 MHz frekans aralığında birkaç farklı sıcaklık değeri için kapasitenin frekans ile değişimi Şekil 4.33'te gösterilmiştir.

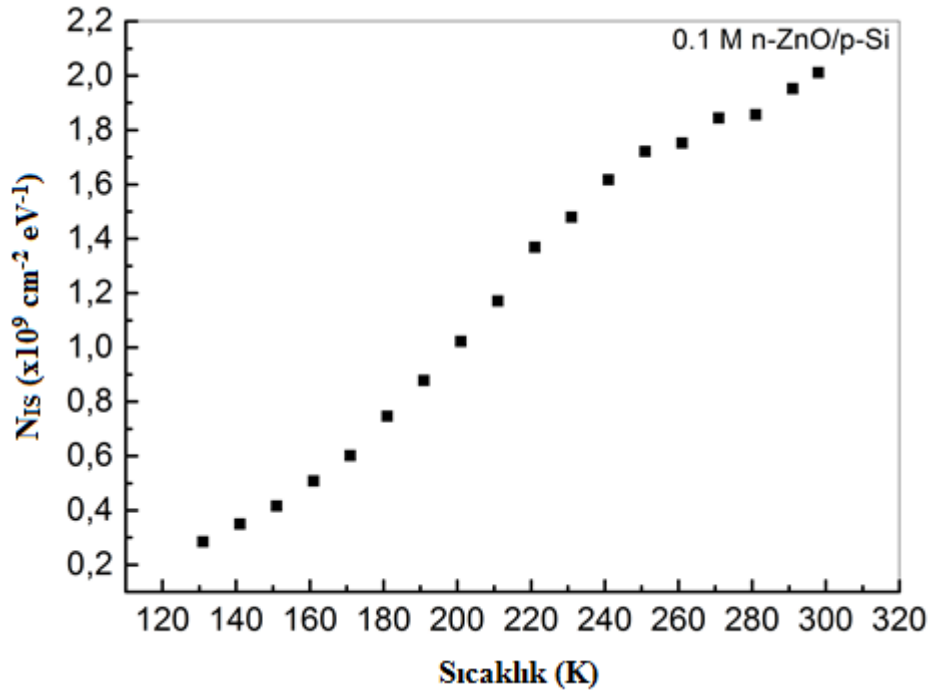


Şekil 4.33. Sıcaklığa bağlı kapasitans-frekans değişimi

Kapasite-frekans ölçümleri ve Eş. (2.12) kullanılarak n-ZnO/p-Si heteroeklemlerin ara yüzey durum yoğunluğu hesaplandı. Buna göre en küçük ve en büyük frekans değerlerindeki kapasite değerleri kullanılarak oda sıcaklığında ara yüzey durum yoğunluğu $2,5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}/\text{eV}^{-1}$ olarak ve referans örnek için ise $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}/\text{eV}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Bununla beraber 100 kHz ve 100 Hz frekans değerlerine karşı gelen $C-T$ değişimleri (Şekil 4.34) ve bu C değerlerinin farkları yardımı ile hesaplanan sıcaklığa bağlı ara yüzey durum yoğunlukları Şekil 4.35’de gösterilmiştir. Yüksek frekans (100 kHz) için $C-T$ değişiminin hemen hemen sabit olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle beklendiği gibi düşük frekans $C-T$ değişimine benzer bir değişim elde edilmiştir.



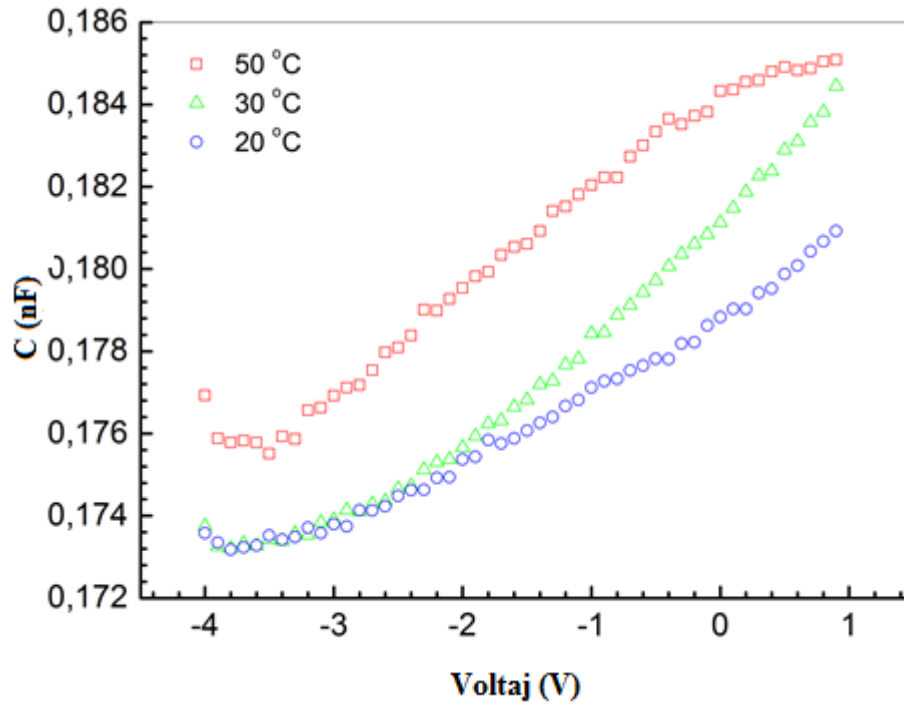
Şekil 4.34. Yüksek frekans ve düşük frekans için sıcaklığa bağlı kapasite değişimi



Şekil 4.35. Heteroeklemlerin ara yüzey durum yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

Eklem yapılarında kapasitans, frekans ile değişmektedir. Yapı içinde bulunan tuzakların yükleri yakalaması veya yakalanmış yükleri serbest bırakması için zaman gereklidir. Kapasitans ölçümleri için örnek üzerine küçük genlikli DC üzerine bindirilmiş bir test sinyali uygulanır. Eğer frekans çok yüksek ise başka bir deyişle küçük zaman değerlerinde tuzaklar yükleri yakalayamaz veya geri bırakamaz bu nedenle kapasitans değerinde bir azalma gözlenir.

500 kHz frekans değeri için farklı sıcaklıklarda (20 °C, 30 °C ve 50 °C) besleme voltajı ([-4, 1] V) ile kapasite değişimi Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Buna göre artan sıcaklıkla beraber, özellikle -2V voltaj değerinden sonra belirgin bir artış gözlenmektedir. Bununla beraber sıcaklık 20 °C'den 30 °C'ye çıkarıldığında C-V değişiminde eğim artışı, 30 °C'den 50 °C'ye dereceye gidildiğinde eğimin değerinde azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.36. 0,1 M n-ZnO/p-Si heteroeklemin 500 kHz frekans değeri için voltaj-kapasitans değişimi

5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, UKP sistemi kullanılarak uygun şartlar altında n-tipi olarak elde edilen ZnO polikristalinin, p-tipi Si (100) alttaş üzerine büyütülmesi ile elde edilen n-ZnO/p-Si heteroeklemlerin karakterizasyonu hedeflenmiştir. Başlangıç püskürtme çözeltisi içindeki ZAD miktarına bağlı olarak optik ve elektriksel özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

UKP sisteminde elde edilen ZnO ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde Zn içeren başlangıç çözelti akış hızının film oluşum sürecinde önemli rol oynadığı gözlenmiştir. Çözelti akış hızının 5 ml/min değerinden büyük olduğu durumda, alttaş yüzeyinde ± 20 °C civarında sıcaklık dalgalanmaları gözlenmiştir. Bununla beraber çözelti akış hızının düşük değerleri için Zn içeren damlacıklar alttaş yüzeyine ulaşmadan buharlaşmakta. Her iki durumda da X-ışınları kırınım deseni dikkate alındığında düşük şiddetli ZnO'ya karakteristik pikler gözlenmiş olmasına rağmen belirgin bir tercihli yönelimden (002) söz edilemez. Çözelti akış hızının (akış hızı ~ 1,5 ml/min) uygun değerleri için alttaş sıcaklık dalgalanmalarında azalma (± 1 °C) ve (002) tercihli yönelime sahip tek kristal benzeri bir X-ışını kırınım deseni gözlenmiştir. Sonuç olarak UKP tekniğinde çözelti akış hızının taşıyıcı gaz akış hızı ile birlikte alttaş atomizer arasındaki mesafeye göre optimize edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen ZnO ince filmlerin film kalınlıkları, optik band aralıkları vb. optik sabitleri optik geçirgenlik spektrumları yardımı ile belirlenmiştir. Uygun film kalınlığına sahip ZnO ince filmlerin optik geçirgenlik spektrumlarında yeterli sayıda girişim saçaklarının gözleendiği durumlarda klasik yöntem olarak bilinen zarf veya Swanepoel yöntemi kullanabilmesine rağmen bu çalışmada nokta tabanlı kısıtlamasız minimizasyon algoritması (PUMA) kullanılmıştır. Çünkü bu yöntem optik geçirgenlik spektrumunda girişim etkileri gözlemlenir veya gözlenmesin kullanılabilir. Çözelti akış hızı esas olarak film kalınlığını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Uygun ön çözelti akış hızı için biriktirme süresini değiştirerek farklı kalınlıklarda (100-1750 nm) filmler elde edilebilir. Film kalınlığı arttıkça gözlenen girişim saçakları sayısı artmaktadır. Film kalınlığının düşük olduğu

durumlarda optik geçirgenlik spektrumunda, dalgaboyuna bağlı olarak çok az sayıda saçak veya saaksız davranış gözlenmiştir.

Farklı molaritelerde (0,04, 0,08 ve 0,1 M) ZAD içeren n zelteleri kullanılarak elde edilen heteroeklemlerin elektriksel karakterizasyonu iki başlık altında incelenmiştir. İlk olarak eklemlerin akım-voltaj ($I-V$) karakteristikleri incelenmiştir. Bu incelemeler genellikle oda sıcaklığında yapılmış olmasına rağmen 0,1 M ZAD içeren eklemin ve referans eklemin (K1) akım voltaj değişimleri 130-300 K aralığında sıcaklığın fonksiyonu olarak da incelenmiştir. Elektriksel lmler için sandviç yapıda bulunan eklemlerin alt ve st yüzeylerine elektriksel kontaklar için gümüş boya kullanılmıştır. İdealite faktörü 0,04 ve 0,08 M ZAD içeren eklemler için 2 civarında iken 0,1 M ZAD içeren örnek için bu değer hızla artmaktadır. Benzer bir artış referans rneği (K1) için de gözlenmiştir.

Eklemlerin kapasitans değişimleri frekansa ve uygulanan voltaja bağlı olarak incelenmiştir. Beklendiği gibi herhangi bir ters voltaj uygulanmadığında, artan frekans değerleri ile eklemlerin kapasitans değerleri hızla azalmıştır. Bu durum artan frekans ile taşıyıcıların elektrik alan değişimini hissedememesi şeklinde açıklanabilir.

Ters besleme voltajı altında $C-f$ değişimleri dikkate alındığında düşük frekanslarda (1 kHz) gözlenen tepe noktası artan frekans ile (10 kHz) düşük voltaj değerlerine doğru kaydığı gözlenmiştir. Ancak beklendiği gibi frekans arttıķa örneklerin kapasitans değişimi azalmakta ve $C-V$ değişiminde pik gözlenmemektedir. Bununla beraber artan ZAD miktarı ile gözlenen tepe noktası daha düşük ters voltaj değerlerine doğru hareket etmektedir.

Sıcaklığa bağlı $C-V$ değişimleri incelendiğinde; düşük sıcaklıķlarda (~200 K) voltajdan bağımsız sabit olan C değerleri sıcaklık artışı ile artmakta ve iki eğimli bir doğrusal davranış sergilemektedir.

Bu alışmalar işığında, benzer yapının farklı kalınlıktaki ZnO filmler ile yeniden incelenmesinde fayda vardır. Artan kalınlık ile $I-V$, $C-V$ ve $C-f$ değişimleri incelenerek gözlenen davranışlar ile taşıyıcı yoğunluğu ve kusur yoğunlukları hakkında bilgi edinilebilir. Ayrıca bu niceliklerin sıcaklıkla değişimi hassas bir kryostat sistemi kullanılarak yapılırsa tuzak seviyeleri hakkında bilgi edinilebilecektir.

KAYNAKLAR

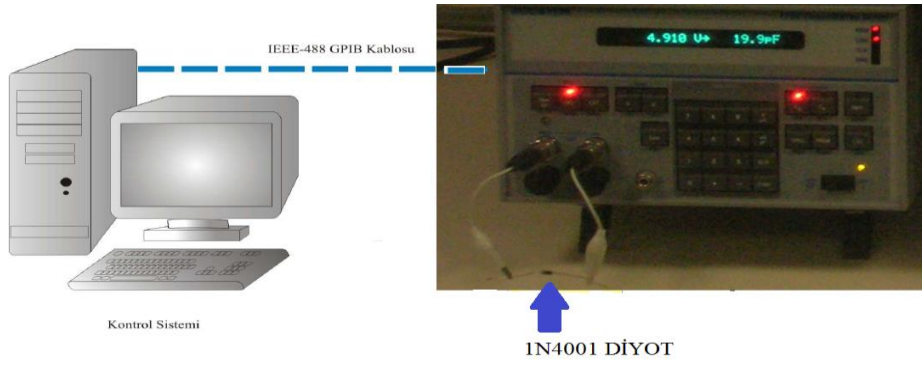
- Aksoy, S., Caglar, Y., 2012. Effect of ambient temperature on electrical properties of nanostructure n-ZnO/p-Si heterojunction diode, *Superlattices and Microstructures* 51: 613–625.
- Al-Heniti, S., Badran, R. I., Al-Ghamedi, A. A., Al-Agel, F. A., 2011, Electrical Properties of p-Si/n-ZnO Nanowires Heterojunction Devices, *Advanced Science Letters*, 4(1): 24-28.
- Ali, A., H., 2008. Development of Self-Assembled ZnO Nanostructures in Diblock Copolymers on Large Area Si Wafers and Gas Sensor Applications. (Doktora Tezi), University of Maryland. 169 s.
- Anderson, R.L., 1962. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions. *Solid State Electronics*, 5: 341.
- Baydoğan, N., Gokce, Y., Baydoğan, M., Cimenoglu, H., 2013. Capacitance-voltage (C-V) properties of ZnO:Al/p-Si heterojunctions. *Defect and Diffusion Forum*, 334-335:349-352.
- Bilgin, V., 2003. ZnO Filmlerinin Elektrik, Optik, Yapısal ve Yüzeysel Özellikleri Üzerine Kalay Katkısının Etkisi (Doktora Tezi). Osmangazi Üniversitesi, Türkiye, 185 s.
- Birgin, E.G., Chambouleyron, I., Martinez, J.M., 1999. Estimation of the optical constants and the thickness of thin films using unconstrained optimization. *Journal of Computational Physics*, 65, 65-78.
- Chaabouni, F., Abaab, M., Rezig B., 2006 Characterization of n-ZnO/p-Si films grown by magnetron sputtering, *Superlattices and Microstructures* 39: 171–178.
- Colinge, J. P., Colinge, C. A., 2011. *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği (Physics of Semiconductor Devices)* Nobel Yayıncılık, Türkiye. s: 452.
- Cullity, B. D., 1978. The Elements of X-Ray Diffraction, İkinci Baskı., Addison–Wesley, Reading, Massachusetts, s.102.
- Çetin, S. Ş., 2010. GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Türkiye, s: 124.
- Dolbec, R., ElKhakani, M.A., Serventi, A.M., Trudeau, M., Saint-Jacques, R.G., 2002. Microstructure and physical properties of nanostructured tin oxide thinfilms grown by means of pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 419, 230–236.
- Erarslan, N., 2010. Geniş Bant Aralıklı Saydam İletken Oksit Zno İnce Filmlerinin Kalınlığına Bağlı Elektriksel ve Optiksel Karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Akdeniz Üniversitesi Türkiye.
- Ferreira, S.O., Leal, F.F., Faria, T.E., Oliveira, J.E., Motisuke, P., Abramot, E., 2006. Characterization of CdTe thin films grown on glass by hot wall epitaxy. *Brazilian Journal of Physics*, 36, 2A.
- Ginley, D. S., Hosono, H., Paine, D. C., 2010. Handbook of Transparent Conductors. *Springer is part of Springer Science and Business Media*, 535 p.
- Güngör, T. 1998. Determination of optical constant and thickness for a-SiNx:H thin film, *Journal of Research in Physics*, 27 (1), 1-9.

- Güngör, T. 2001., Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum filmlerinin optik katsayılarını belirlemede kullanılan deneysel yöntemlerin karşılaştırılması. Doktora Tezi. Hacettepe Üniversitesi. Ankara.
- Kamei, M., Enomoto, H., Yasui, I., 2001. Origin Of The Crystalline orientation dependence of the electrical properties in tin-doped indium oxide films, *Thin Solid Films*, 392,265-268.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2004, İdeal Olmayan Schottky Diyotlarının Temel Parametrelerinin Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiklerinden Hesaplanması, *KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2): 20-25.
- Kılınç T, 2006. Zn_{1-x}Fe_xS İnce Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans) Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- Kittel, C., 1996. *Katıhal Fiziğine Giriş*, Güven Yayınları, İstanbul. Mensur. 434 s.
- Kokaj, J., Rakhshani, A. E., 2004. Photocurrent spectroscopy of solution-grown CdS films annealed in CdCl₂ vapour. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 1970–1975.
- Kotlyarchuk, B., Savchuk, V., Oszwaldowski, M. 2005. Preparation of undoped and indium doped ZnO thin films by pulsed laser deposition method, *Crystal Research and Technology*, 40, 12, 1118-1123.
- Lee, J., 2006. Microstructure and Properties of Zinc Oxide Nano-Crystalline Thin Films and Composites. (Doktora Tezi) The University of Auckland, Yeni Zellanda.
- Milnes, A. G., Feucht, D. L., 1972. *Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions*. Academic Press Inc., Oval Road, London.
- Minkov, D. A. 1989., Method for determining the optical constants of a thin film on a transparent substrate, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 22, 199-205.
- Mondal, S., Kanta, K. P., Mitra, P., 2013, Preparation of ZnO Film on p-Si and I-V Characteristics of p-Si/n-ZnO *Materials Research*.; 16(1): 94-99.
- Mridha, S., Dutta M., Basak D., 2009 Photoresponse of n-ZnO/p-Si heterojunction towards ultraviolet/visible lights: thickness dependent behavior, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics: Mater Electron* 20:S376–S379.
- Mutlu, T., 2010. Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs Yapılı p-n Eklem Diyotun Tavlama Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Türkiye, s: 3-26.
- Nadeem, M.Y., Ahmed, W., 2000. Optical properties of ZnS thin films. *Turk J Phy*, 24, 651-659.
- Norde, H. A. 1979. Modified forward I-V plot for schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50: 5052-5054.
- Ocak, Y., S., 2012, Electrical characterization of DC sputtered ZnO/p-Si heterojunction, *Journal of Alloys and Compounds* 513: 130– 134.
- Özgür, Ü., Alivov, Ya. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan S., Avrutin V., Cho, S.-J., ve Morkoç H., 2005. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, s: 98, 041301.
- Öztaş, M. 1996., Investigation the structural and electro-optical properties of chemically deposited ZnS and CdS thin films and the thermoluminescence properties of ZnS films (Doktora Tezi) Gaziantep Üniversitesi. S: 121.

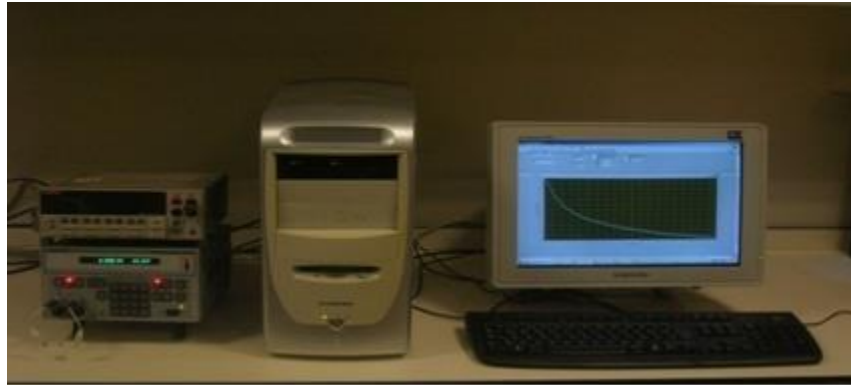
- Özyurt Kuş, F., 2010. Bakır Oksit/Çinko Oksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi (Doktora Tezi).Ankara Üniversitesi, Türkiye.
- Rusu, R.S., Rusu, G.I. 2005. On the electrical and optical characteristics of Cd thin films, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7, 2, 823-828.
- Sah, C. T., Noyce, R.N., Shockley, W., 1957. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics, *Browse Journals & Magazines*. 45, 1228-1243.
- Sarı, H., 2009. *Optoelektronik Ders Notları*. Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ankara.
- Sharma, S., Periasamy, C., 2014, Simulation, Study and Performance Analysis of n-Zno/p-Si Heterojunction Photodetector, *Journal of Electron Devices*, Vol. 19, pp. 1633-1636.
- Shockley, W. and Read, W. T., 1952. *Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons*. Phys. Rev. 87,835.
- Subramanyam, T. K., Srinivasulu Naidu, B., Uthanna, S., 1998. Effect of substrate temperature on the physical properties of DC reactive magnetron sputtered ZnO films. *Optical Materials* 13, 239-247.
- Swanepoel, R., 1983. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16, 1214-1222.
- Sze, S. M. ve Kwok, K. Ng., 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. Third Edition, San Jose. California. ABD. s: 7-213.
- Skoog D. A., Holler F.J., Nieman T. A., 2006. *Enstrümantal Analiz İlkeleri*. Birinci Baskı, Bilim Yayıncılık. S: 272-561.
- Tauc J., Grigorovici R., Vancu A., 1966. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *Physics of the Solid State*. 15, 627.
- Tavakolian, H., Sites, J.R., 1988. Photovoltaic Specialists Conference, *Conference Record of the Twentieth IEEE*, 1608-1613.
- URL 1 son erişim: (14 Mart 2014), <http://iys.inonu.edu.tr/webpanel/dosyalar/1259/file/bandyapisi.pdf>
- URL 2 son erişim: (25 Mart 2014) <http://www.mtixtl.com/ProductImages/xtlpic/Si-Concentr.jpg>
- URL 3 son erişim: (20 Nisan 2014), http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, Refractive index. http://en.wikipedia.org/wiki/Refractive_index..
- Wang Z., L., 2009 ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology, *Materials Science and Engineering V*: 64, P: 35
- Yakuphanoglu, F., Caglar, Y., Caglar, M., Ilican, S., ZnO/p-Si heterojunction photo diode by sol-gel deposition of nanostructure n-ZnO film on p-Si substrate, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13: 137-140.
- Zebbar, N., Kheireddine, Y., Mokeddem, K., Hafdallah, A., Kechouane, M., Aida, M.S., 2011, Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray, *Materials Science in Semiconductor Processing* 14: 229-234.

EK 1

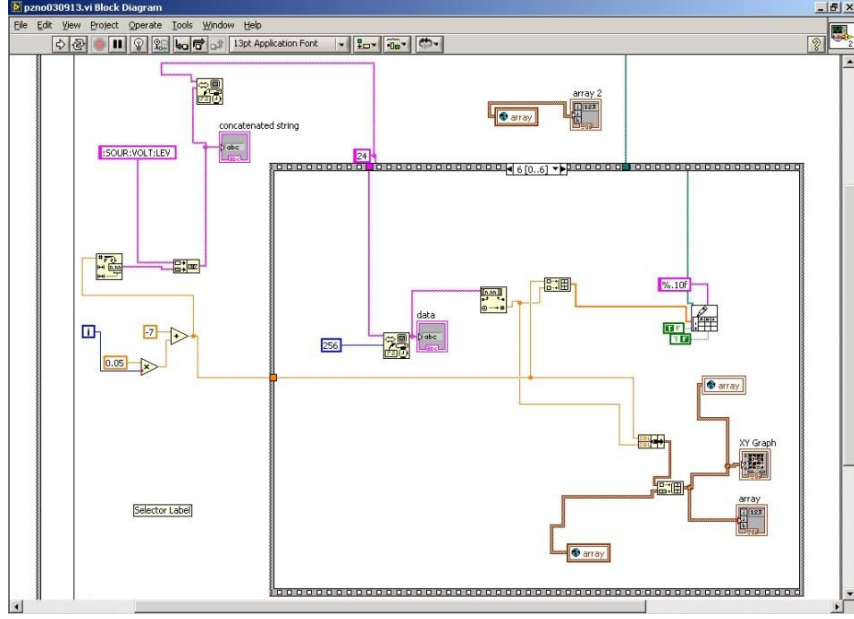
Kapasitans-voltaj ($C-V$) ölçümlerinde (BOONTON 7200, 1 MHz) kapasitansmetre kullanılmıştır. $C-V$ ölçümleri, GPIB protokolü kullanan bir IEEE-488 kontrol kartı ile bilgisayara aktarılmıştır (Şekil E.1). $C-V$ ölçüm sistemi (Şekil E.2) ve kullanılan LabVIEW programına ait görünüş Şekil E.3'te gösterilmiştir.



Şekil E.1. $C-V$ ölçüm sistemi şematik gösterimi

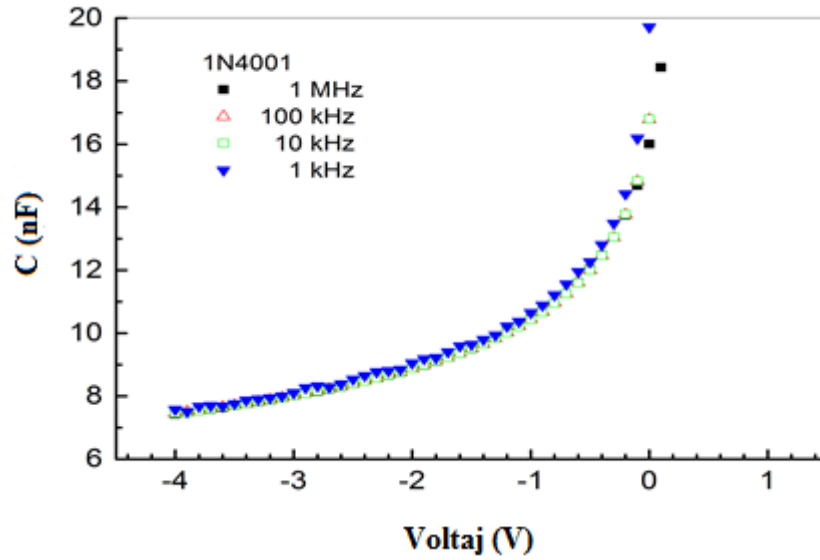


Şekil E.2. $C-V$, $I-V$ ölçüm sistemi şematik gösterimi

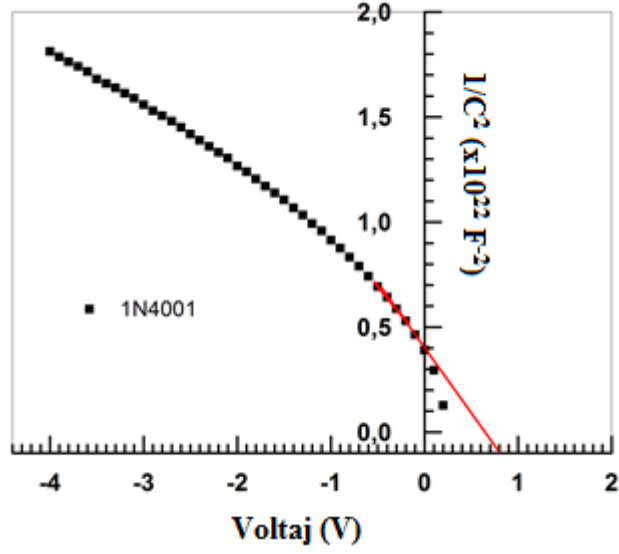


Şekil E.3. C-V ölçümünde kullanılan LabVIEW programın görünümü

Karakteristik değişimleri bilinen 1N4001 diyodu için ters besleme voltajı ile kapasitans değişimi Şekil E.4.'te gösterilmiştir.



Şekil E.4. Ters beslemede 1N4001 diyotunun Kapasitans-Voltaj değişimi



Şekil E.5. 1N4001 için $1/C^2-V_a$ değişimi

1N4001 diyotuna ait $1/C^2-V$ değişimi Şekil E.5'te gösterilmiştir.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(N_1\varepsilon_1 + N_2\varepsilon_2)(V_{bi} - V_a)}{qA^2N_1N_2\varepsilon_1\varepsilon_2} \quad (2.12)$$

V_{bi} değerini elde etmek için eşitlik (2.12) kullanılır. Bunun için $1/C^2-V_a$ değişiminde eğim $\frac{2(N_1\varepsilon_1 + N_2\varepsilon_2)}{qA^2N_1N_2\varepsilon_1\varepsilon_2}$ ve düşey eksen kesim noktası ile de V_{bi} değeri hesaplanabilir.

$Y = A + B * X$ şeklinde ifade edilen doğrusal davranış için hesaplanan uyum parametreleri aşağıda (Çizelge E.1) gösterilmiştir.

Çizelge E.1. Doğrusal davranış için hesaplanan uyum parametreleri (R=-0,99944 ve standart sapma, SD=0,00288)

Parametere	Değer	Hata
A	0,42231	0,00473
B	-0,54477	0,01286

A ve B değerleri yardımı ile $V_{bi}=0,78$ V olarak hesaplandı.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Aydın YILDIRIMLAR

Doğum Yeri ve Yılı: Korkuteli/01.03.1983

Medeni Hali: Bekar

Yabancı Dili: İngilizce



Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Kızılkaya Hacı İbrahim Çelik Lisesi / 2000

Lisans: Abant İzzet Baysal Üniversitesi / (2001-2006)

Yüksek Lisans: Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi / (2011-....)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

As Çimento San. ve Tic. A.Ş. (2009-2011)

Ümitaş Kimya San. ve Tic. A.Ş. (2011-2014)

Ulusal ve uluslararası toplantılarda poster bildirisi olarak sunulan çalışmalar:

- 1- Aydın YıldırımLAR, Ebru Güngör ve Tayyar Güngör, Admittans Spektroskopisi ile Yarıiletken Eklemlerin Karakterizasyonu, Yoğun Madde Fiziği- Ankara Toplantısı, Bilkent Üniversitesi, 20 Aralık 2013.
- 2- Ömer Ali Türkcan, Aydın YıldırımLAR, Ebru Güngör ve Tayyar Güngör, ZnO İnce Filmlerin Optik Bant Aralığının Eşik Dalgaboyu Yöntemiyle Hesaplanması, Yoğun Madde Fiziği- Ankara Toplantısı, Bilkent Üniversitesi, 20 Aralık 2013.

3. A. Yıldırımlar, E. Güngör, V. Bilgin and T. Güngör, The effects of temperature on the current and capacitance characterization of n-ZnO/p-Si heterojunction, Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, 2-5 Eylül 2013, İstanbul – Türkiye.
4. A. Yıldırımlar, E. Güngör and T. Güngör, The frequency dependent capacitance characterization of n-ZnO/p-Si heterojunction, Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, 2-5 Eylül 2013, İstanbul – Türkiye.
5. Aydın Yıldırımlar, Ebru Güngör, Tayyar Güngör, zelti akış hızının ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile hazırlanan ZnO ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerine etkisi, XIII. Ulusal Spektroskopi Kongresi, Mayıs 2013, Burdur-Türkiye