



MİS YAPILARDA ARA YÜZEY KARAKTERİZASYONU

Rıdvan OKUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2016

Rıdvan OKUR tarafından hazırlanan “MİS YAPILARDA ARA YÜZEY KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Sema Bilge OCAK

İleri Teknolojiler, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Elif ORHAN

İleri Teknolojiler, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Canan AYDAŞ

Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, TAEK

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 27/10/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza
Rıdvan OKUR

27.10.2016

MIS YAPILARDA ARA YÜZEY KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Rıdvan OKUR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2016

ÖZET

Al/ZnO/p-Si Schottky diyolar hazırlanarak akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ve iletim-gerilim (G-V) karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda ölçüldü. Al/ZnO/p-Si Schottky diyotların saturasyon akımı (I_0), ideallik faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve seri direç (R_s) parametreleri termoiyonik emisyon teorisi kullanılarak elde edilen düz beslem I-V karakteristikleri ile hesaplandı. Elde edilen n , Φ_B and R_s (Cheung methodu kullanılarak) verilerinin, $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I fonksiyonları için; 0,60-0,70 eV, 0.51-0.802 eV aralığında, 1.46,3-3.19 k Ω ve 1.5-3.62 k Ω aralığında değiştiği gözlemlendi. Al/ZnO/p-Si yapıların frekansa bağlı kapasite-gerilim (C-V) ve iletim-gerilim (G-V) karakteristikleri seri dirençler (R_s) ile arayüzey durumları (N_{ss}) etkileri göz önünde bulundurularak incelendi. Al/ZnO/p-Si yapıların C-V ve G-V ölçümleri oda sıcaklığında 30kHz-1 MHz frekans aralığında yapıldı. Deneysel sonuçlar, C ve G değerlerinin frekans arttıkça azaldığını gösterdi. C ve G değerlerinde düşük frekanslarda görülen bu davranışın Si/ZnO arayüzeyinde meydana gelen N_{ss} değerinden kaynaklandığı tespit edildi. Böylelikle numuneden C_c ve G_c değerlerini elde etmek için R_s etkisi göz önünde bulundurularak düz beslem ve ters beslem için de yüksek frekansta C_m and G_m/w değerleri ölçüldü. Sıfır beslem altında her bir frekansta, R_s değerinin anormal derecede pik yaptığı görüldü. C^{-2} -V eğrisi her bir frekans değeri için geniş bir beslem aralığında lineer bir davranış sergiledi. Katkılama yoğunluğu N_A , tüketim katmanı genişliği W_D ve bariyer yükseliği Φ_B değerleri C^{-2} -V eğrisinden elde edildi.

Bilim Kodu : 20226
Anahtar Kelimeler : Yarıiletken, schottky diyot, ideallik faktörü, bariyer yüksekliği
Sayfa Adedi : 57
Danışman : Doç. Dr. Sema Bilge OCAK

INTERFACE CHARACTERIZATION OF MIS STRUCTURES

(M. Sc. Thesis)

Rıdvan OKUR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2016

ABSTRACT

Al/ZnO/p-Si Schottky diodes were prepared in the same conditions and their current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) characteristics were measured at room temperature and in the dark. The characteristic parameters such as saturation current (I_0), ideality factor (n), barrier height (Φ_B) and series resistance (R_s) of the Al/ZnO/p-Si Schottky diodes were determined from the forward bias I-V characteristics by using thermionic emission theory. . The obtained values of n , Φ_B and R_s (Cheung method) were changed in the ranges 0,60-0,70 eV, 0,51-0,802 eV and 1,46,3-3,19 k Ω ve 1,5-3,62 k Ω for $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I functions respectively. The frequency-dependent capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) characteristics of the Al/ZnO/p-Si structures were investigated by considering series resistance (R_s) and interface states (N_{ss}) effects. The C-V and G-V measurements of the Al/ZnO/p-Si structures were carried out in the frequency range of 30kHz-1 MHz at room temperature. Experimental results showed that both the values of C and G decreased as the frequency increased. Such behavior of C and G at low frequencies resulted from the existence of N_{ss} at Si/ZnO2 interface. The effect of R_s on the C and G were found noticeable at high frequency. Therefore, the high frequencies C_m and G_m/w values measured under both forward and reverse bias were corrected for the effect of R_s to obtain the real C_c and G_c values from the sample. The profile of R_s exhibits an anomalous peak at each frequency about at zero-bias. The C^{-2} -V plots displayed a linear behavior in a wide bias voltage region for each frequency value. The values of doping concentration N_A , depletion layer width W_D and barrier height Φ_B were obtained from C^{-2} -V plots.

Science Code : 20226

Key Words : Semiconductor, schottky diode, ideality factor, barrier height

Page Number : 57

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Sema Bilge OCAK

TEŞEKKÜR

Tecrübesi ve değerli bilgisiyle tez konumu belirlememde, yaptığım bütün çalışmalarda zaman gözetmeksizin her türlü yardım ve desteğini benden esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım ve hocam sayın Doç. Dr. Sema Bilge OCAK'a,

Numunelerin hazırlanmasında ve laboratuvar çalışmalarında tecrübelerini benimle paylaşan ve yol gösteren Doç. Dr. Birkan SELÇUK'a,

Çalışmalarında beni yakından takip ederek her türlü bigisini paylaşan ve destek olan Prof. Dr. Elif ORHAN'a,

Beni sonuna kadar destekleyen ve motive eden değerli çalışma arkadaşlarıma, bütün eğitim-öğretimimde ve iş hayatımda maddi-manevi desteklerini her zaman hissettiren başta eşim olmak üzere sevgili aileme sonsuz minnet ve teşekkürü kendime bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	5
2.1.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	5
2.1.2. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	9
2.1.3. Metal/ p -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	10
2.1.4. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	12
2.2. İdeal MIS Yapı.....	14
2.2.1. Yığılma.....	16
2.2.2. Tüketim.....	16
2.2.3. Tersinim.....	17
2.3. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları.....	17
2.3.1. Schottky diyotlarda termoiyonik emisyonla akım iletimi.....	18
2.4. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkileri.....	22
2.5. Engel Yüksekliği Ölçme Yöntemleri.....	23

	Sayfa
2.5.1. Akım-gerilim (I-V).....	23
2.5.2. Kapasite-gerilim (C-V).....	24
2.6. Cheung Fonksionları.....	25
2.7. Ara Yüzey Durumları.....	26
3. MATERYAL VE METOT.....	27
3.1. Giriş.....	27
3.2. ZnO'nun Genel Özellikleri.....	27
3.2.1. Kristal yapısı.....	28
3.2.2. Mekanik özellikler.....	29
3.2.3. Elektriksel özellikler.....	29
3.3. Al/ZnO/p-Si Yapının Hazırlanması.....	30
3.3.1. Kristal temizleme.....	30
3.3.2. Al/ZnO/p-Si diyotların hazırlanması.....	32
3.3.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....	34
3.4. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. Düz Beslem Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	37
4.3. Kapasite-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim Karakteristikleri.....	41
5. SONUÇ.....	49
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. ZnO'nun çeşitli özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_o ve Φ_b	40
Çizelge 4.2. Cheung metodu ile elde edilen R_s , n ve Φ_b değerleri.....	40
Çizelge 4.3. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının farklı frekanslarda hesaplanan temel elektrik parametreleri ile R_s ve N_{ss} değerleri.....	48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan önce enerji-bant diyagramı.....	6
Şekil 2.2. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan sonra termal dengedeki enerji-bant diyagramı.....	7
Şekil 2.3. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın $V < 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 2.4. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın $V > 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı.....	8
Şekil 2.5. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan sonra enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 2.6. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan sonra enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 2.7. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı a) düz beslem altında b) ters beslem altında.....	10
Şekil 2.8. Metal/ p -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın (a) kontakdan önce ve (b) kontakdan onra ve termal dengede enerji-bant diyagramı.....	11
Şekil 2.9. Metal/ p -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $V \neq 0$ olması durumunda enerji-bant diyagramı.....	12
Şekil 2.10. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan önce enerji-bant diyagramı.....	12
Şekil 2.11. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan sonra enerji-bant diyagramı.....	13
Şekil 2.12. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontağın $V \neq 0$ durumunda enerji-bant diyagramı.....	13
Şekil 2.13. İdeal MIS Yapısı.....	14
Şekil 2.14. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	14
Şekil 2.15. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması (a) yığılma (b) yüketim (c) tersinim.....	15

Şekil	Sayfa
Şekil 2.16. Yığılma, tüketim ve terslenme durumlarında MIS yapıdaki yüklerin dağılımı.....	16
Şekil 2.17. Metal/yarıiletken kontaklarda doğru ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları.....	18
Şekil 2.18. Bir metal yüzeyi ile vakum arasında enerji-bant diyagramı	23
Şekil 4.1. Tüm Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotlarının düz beslem I-V karakteristikleri.	38
Şekil 4.2. Tüm Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem I-V Karakteristikleri.....	39
Şekil 4.3. Tüm Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln(I)$ -I eğrileri.....	39
Şekil 4.4. Tüm Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotlarının $H(I)$ -I eğrileri.....	40
Şekil 4.5. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı C-V eğrileri.....	42
Şekil 4.6. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı C-V eğrileri.....	42
Şekil 4.7. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı R_s -V eğrileri.....	44
Şekil 4.8. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı R_s -V eğrileri.....	44
Şekil 4.9. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı G_c -V eğrileri.....	45
Şekil 4.10. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı G_c -V eğrileri.....	45
Şekil 4.11. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı C_c^{-2} -V eğrileri.....	47
Şekil 4.12. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı C_c^{-2} -V eğrileri...	47

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Beher Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo.....	31
Resim 3.2. Innovation Water Purification marka deiyonize su sistemi.....	32
Resim 3.3. Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği.....	32
Resim 3.4. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si Schottky diyotların hazırlanması için kullanılan Edwards marka buharlaştırma sistemi.....	33
Resim 3.5. (a) Omik kontak maskesi (b) Doğrultucu kontak maskesi.....	33
Resim 3.6. Al/ZnO/ <i>p</i> -Si yapısı.....	34
Resim 3.7. Yokogawa Gs610 Source ölçüm cihazı.....	35
Resim 3.8. Agilent 4294A Empedans Analizörü.....	35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Alan
C	Sığa
Å	Angström
Si	Silisyum
ZnO	Çinko Oksit
Al	Alüminyum
Au	Altın
Ag	Gümüş
A*	Etkin Richardson sabiti
NH₄OH	Amonyum hidroksit
HF	Hidroflorik asit
Dn	Elektron difüzyon sabiti
Dp	Deşik difüzyon sabiti
Ds	Arayüzey durum yoğunluğu
Eg	Yarıiletken yasak enerji aralığı
Ec	İletkenlik bant kenarı enerjisi
Ev	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
Ef	Fermi enerjisi
E(x)	Schottky bölgesindeki elektrik alan
Ea	Aktivasyon enerjisi
ε₀	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ε_i	Yalıtkan malzemenin dielektrik geçirgenliği
ε_s	Yarıiletken malzemenin dielektrik geçirgenliği
H₂O	Su
Hz	Hertz (Frekans birimi)
MS	Metal/yarıiletken
MIS	Metal/yalıtkan/yarıiletken
MOS	Metal/oksit/yarıiletken

1. GİRİŞ

Metal ve yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinden yararlanmak, onlara uygun kontaklar uygulayarak elektronik devrelerde kullanmak yolundaki ilk ciddi araştırma, 1874'lü yıllarda Braun tarafından yapılmıştır [1]. Çağdaş elektronikte metal yarıiletken kontaklar önemli rol oynayan devre elemanlarıdır [1-16]. Metallerle kontak yapılarak oluşturulan Schottky diyotlar, maliyetinin düşük olması ve kolay elde edilmesi gibi sebeplerden dolayı her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Bu nedenle elektronik ve fizik bilimi alanında yapılan çalışmalarda, teorik ve deneysel olarak önemi gittikçe artmıştır. Elektronik sanayisinde, bu devre elemanlarından, daha çok, mikrodalga kanştırıcı dedektorleri, hızlı anahtarlama (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler) ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörleri olarak faydalanılmaktadır [17].

Yarıiletken devre elemanlarının önemi her geçen gün hızla artmaktadır. Hemen hemen her alanda kullanılmaya başlanan yarıiletken devre elemanları teknolojinin gelişmesiyle beraber daha etkin olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Diyotlar, bu devre elemanlarının başında gelmektedir. Metaller ile yarıiletkenlerden oluşan kontak yapılar, 20. yüzyılın başlarında doğrultucu olarak farklı devre elemanlarının tasarlanmasında rol almıştır.

MS, MIS veya MOS yapıların hazırlanmasında doğrultucu kontak olarak, yarıiletkenin *p*-tipi veya *n*-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonlu metaller seçilir. Metal olarak genellikle altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller yüksek saflıkta kullanılırken yarıiletken olarak, daha ucuz ve kararlı olmasından dolayı genelde silisyum (Si) tercih edilir. Metal ile yarıiletken arasında yük geçişlerini düzenlemek ve yarıiletken aygıtın performansını artırmak için metal ile yarıiletken arasına genelde ya SiO₂, SnO₂, Si₃N₄, TiO₂ gibi yalıtkan bir tabaka ya da poliindol, polianilin ve polivinil alkol (PVA) gibi organik tabakalar büyütülür. Bu ara yüzey tabakalarını seçerken yüzeyi pasivize edecek, sızıntı akımını en aza indirecek, kontrol edilebilir akım-iletim mekanizması gerçekleştirecek ve doğrultucu özelliğe yaklaşacak yüksek dielektrik sabitli malzemelerin seçimine dikkat edilir [18-20].

Schottky kontakların, yüksek frekansta çalışabilmeleri, daha düşük seri dirence sahip olması, anahtarlama hızının yüksek olması, akım kaybının olmaması ve daha verimli olması gibi üstünlükleri, daha kullanışlı olmasını sağlamıştır. Ancak, üretilen kontakların elektronik sistemlerdeki devrelerde daha verimli ve etkin kullanılabilmesi için elde edilen yapıların elektriksel karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu sayede istenilen davranışı sergileyen ve amaca uygun yapılar elde etmek mümkündür. Farklı yöntemler kullanılarak I-V karakteristiği, ideallik faktörü, engel yüksekliği gibi parametrelerin analizi yapılmaktadır [21].

MOS yapıların elektriksel karakteristiklerinin davranışları metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) tipi Schottky engel diyotların davranışına benzerdir. Bu yapıların elektriksel karakteristikleri özellikle ara yüzeysel yalıtkan/polimer tabakanın oluşumuna, metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzeysel özelliklere, seri dirence (R_s) ve Schottky engel yüksekliklerindeki homojensizliğe bağlıdır. Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan ya da polimer tabakanın varlığı ara yüzey durumlarını etkiler ve metal/yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Metal ile yarıiletken arasına yalıtkan ya da polimer bir tabaka kaplandığında MS yapı, MIS veya MOS yapıya dönüşür. Bu yalıtkan veya polimer ara yüzey tabakanın varlığı hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Bu nedenle MIS veya MOS yapılarda akım-iletimi MS yapılardan oldukça farklı olacaktır [22].

Geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler kısa dalgaboyundaki optoelektronik uygulamalarda çok büyük bir ilgi görmektedirler. Bunların arasından ZnO, 3.37 eV geniş bant aralığına ve yüksek eksiton bağlanma enerjisine (60 meV) sahiptir Dolayısıyla ZnO, (UV) ışık yayan aygıtlar, diyot lazerler ve UV dedektörler gibi optoelektronik aygıt tasarımında çeşitli uygulamalar için gelecek vaad eden II-VI oksit yarıiletkenlerden birisi olarak göz önüne alınmaktadır [23-30]. ZnO bazlı optoelektronik aygıtların etkin bir şekilde geliştirilmesi için, alıcı düzey oluşumunun anlaşılmasını gerektiren araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır [29,30].

Son yıllarda yalıtkan/yarıiletken ara yüzeyinin incelenmesi ve akım-gerilim davranışının anlaşılabilmesi için çok sayıda bilimsel çalışma yapılmakta ve çeşitli akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) kuramları geliştirilmektedir. Schottky yapılarındaki ara yüzey durumlarının elektriksel belirtkenleri üzerindeki etkisinin anlaşılması ve denetlenmesi

ideal I-V karakteristiğine yaklaşan Schottky diyotlarının, yarıiletken diyotlarının, transistörlerinin oluşturulmasına, bunların ömürlerinin uzun olmasına ve daha hızlı anahtarlama yapan yapıların elde edilmesine neden olacaktır.

Bu tez çalışması, MIS yapıda Al/ZnO/*p*-Si Schottky tipi devre elemanının üretimi ve elektriksel karakterizasyonu üzerine temellenmektedir. Al/ZnO/*p*-Si Schottky diyotlarının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) karakteristiği oda sıcaklığında frekansa bağlı olarak 30 kHz-1MHz aralığında incelendi. Bu ölçümlerden MIS yapının elektriksel karakteristikleri frekans bağlı olarak mevcut literatür ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlar, elektriksel özelliklerin frekansa oldukça bağlı olduğunu gösterdi. C-V ve G-V değerleri kullanılarak ideallik faktörü, ara yüzey durum yoğunlukluğu hesaplandı.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, metal/yarıiletken ve metal/yalıtkan/yarıiletken Schottky diyotların önemi, kullanım alanları, çalışma prensibi hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde, Metal/yarıiletken ve metal/yalıtkan/yarıiletken schottky diyotların yapısı, akım-iletim mekanizmaları, kontak oluşumları ve ideal durumdan sapma nedenleri incelendi. Üçüncü bölümde, metal/yalıtkan/yarıiletken yapının hazırlanma aşamaları, ZnO'nun temel özellikleri, kullanılan deney ve ölçüm sistemi hakkında detaylı bir bilgi verildi. Dördüncü bölümde, C-V ve G-V ölçümlerinden temel diyot parametreleri hesaplandı. Beşinci bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlar mevcut literatür ile karşılaştırıldı.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar

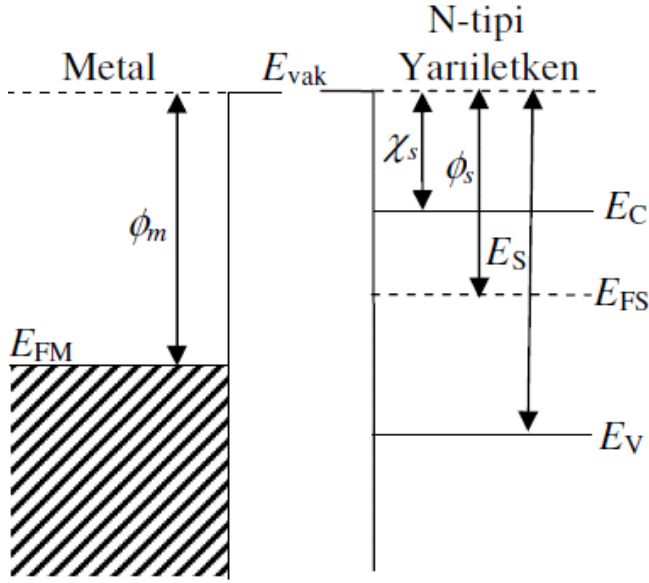
İki farklı madde birbirleriyle temas ettirildiğinde, her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar yük alış verişi olur. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. Dipol tabakası iki metal arasında kontağın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden oluşur. Oluşan bu kontak elektronlarının her iki yönde serbestçe hareket etmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır [10].

En genel anlamıyla kontak, iki maddenin idealde sıfır kabul edilen minimum dirençle birbirine temas etmesidir. İdeal bir kontak elde etmek için temas ettirilen maddelerin temas yüzeylerinin temiz, pürüzsüz ve parlak olması gerekir. Metal/yarıiletken kontaklarda, iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları olandeşikler ve elektronlar bir yönden diğer yöne daha kolay iletiliyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontak denir. Doğrultucu kontaklarda akım doğru beslem altında çok iyi iletilirken, ters beslem altında neredeyse hiç iletilmemektedir. Metal/yarıiletken kontaklarda, kontak türünün doğrultucu veya omik olması, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin türüne (p veya n tipi olmasına) bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s olursa, metal/ n -tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_s < \Phi_m$ olduğu durumlarda doğrultucu kontak, $\Phi_s > \Phi_m$ olduğu durumlarda ise omik kontak oluşur. Metal/ p -tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_s < \Phi_m$ olduğu durumlarda omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olduğu durumlarda ise doğrultucu kontak oluşur.

2.1.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

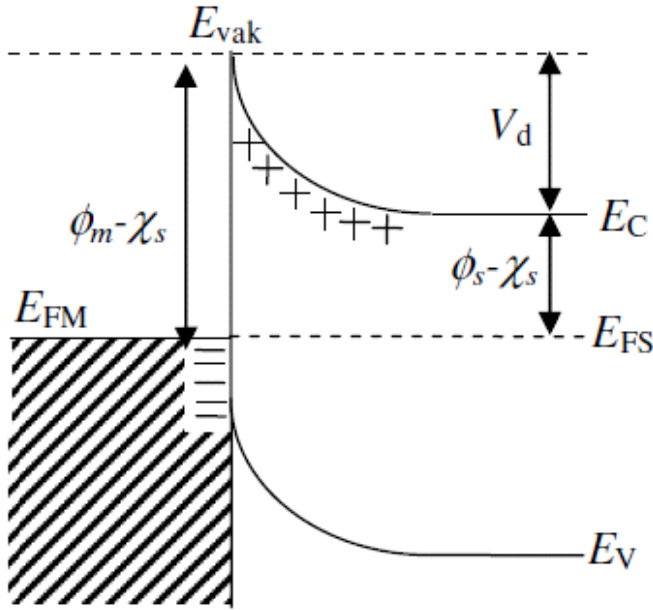
Doğrultucu kontaklar akım taşıyıcılarını (hol ve elektron) bir doğrultudan diğerine göre daha kolay geçiren kontaklardır. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyon Φ_s olmak üzere $\Phi_s < \Phi_m$ olması durumunda metal/ n tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Eğer bir metal ile bir yarıiletken kontak oluşturacaksa bu durumda meydana gelecek olan yapı doğrultucu kontak olur. Bu da Schottky kontak olarak bilinir. Schottky kontak, akımın bir doğrultudan diğer doğrultuya daha kolay aktığı kontakdır. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli nedeniyle ters yöndeki geçişleri zorlaştırır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir [31].

Bu durumu anlayabilmek için bir metal ve bir n -tipi yarıiletkeni ele alalım. Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize durumda olsun. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s , yarıiletkenin elektron ilgisi χ_s ve $\Phi_s < \Phi_m$ olsun. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden Şekil 2.1.de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır.



Şekil 2.1. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın kontakta önce enerji-bant diyagramı

Kontaktan sonra yarıiletken yüzeyden metale elektron geçişi olurken, geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri eşitlenir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçalmıştır. Sonuç olarak, kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli oluşur. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $\Phi_m - \Phi_s$ ve metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır.



Şekil 2.2. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın kontakta sonra termal dengedeki enerji-bant diyagramı

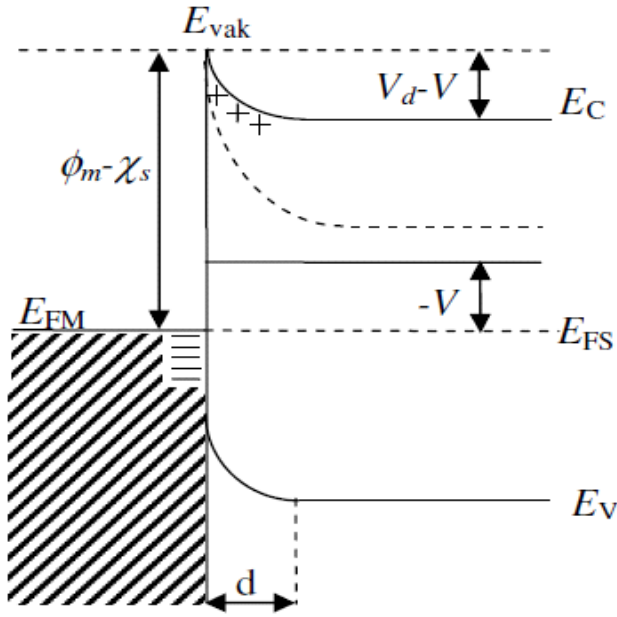
Burada χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Yarıiletkenin elektron yakınlığı, iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına eşittir.

Termal uyarımlarla potansiyel engelini aşmaya yetecek enerjiye ulaşan elektronlar, metalden yarıiletken ve yarıiletkenden metale geçerler. Denge durumunda bu, eşit ve zıt I_0 akımlarına sebep olacaktır.

Yarıiletken Şekil 2.3.'teki gibi bir $-V$ gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletken giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden, bu elektronların oluşturacağı akım da değişmeyecektir. Ancak, yarıiletkenin enerji seviyeleri eV kadar yükselecektir. Bundan dolayı, yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Dolayısıyla, metalden yarıiletken akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar artmış olur. Bu durumda oluşan net akım;

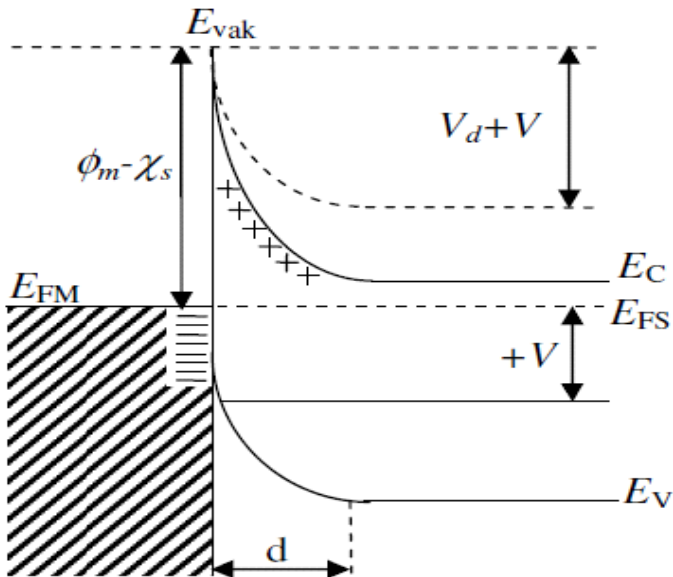
$$I = I_0 \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (2.1)$$

olur ve bu akım pozitifdir. $V > kT/e$ beslem durumuna doğru beslem denir.



Şekil 2.3. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın $V < 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı

Yarıiletken tarafına Şekil 2.4.’teki gibi $+V$ gerilimi uygulanırsa iletkenlik bandı eV kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna $V \ll -kT/e$ olduğu için ters beslem denir.

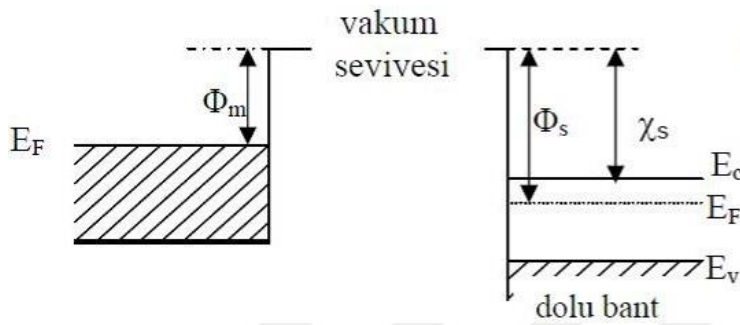


Şekil 2.4. Metal/yarıiletken doğrultucu kontağın $V > 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı

Bu durumda uygulanan voltaja bağı olarak yarıiletken tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği değişmektedir. Diğer taraftan ise metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan voltaja bağı değildir.

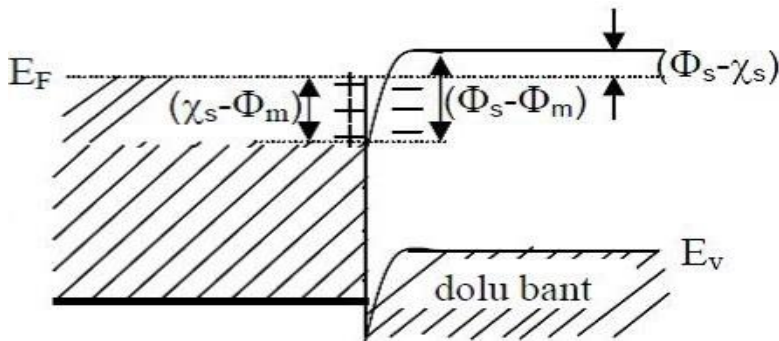
2.1.2. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal/*n*-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_m , metalin iş fonksiyonu Φ_s ve $\Phi_m < \Phi_s$ sağlanması durumunda meydana gelecek olan kontak türü omik kontak türüdür. Şekil 2.5.'de kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı gösterilmiştir.



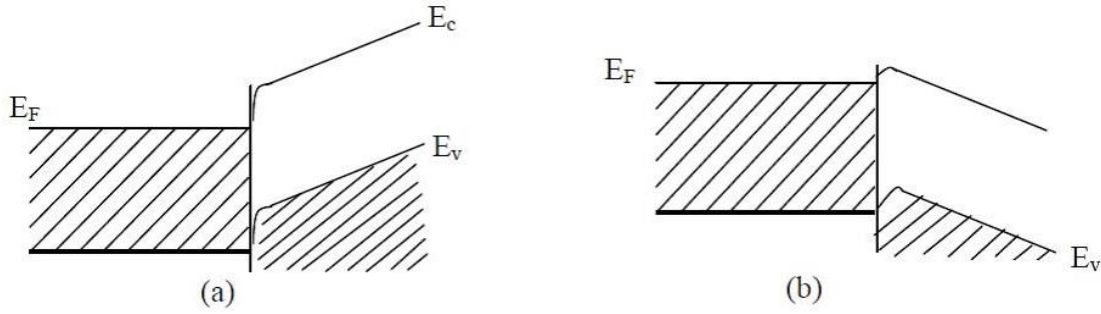
Şekil 2.5. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontakın kontakta önce enerji-bant diyagramı

Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakta sonra bir yük değişimi gerçekleşir. Elektronlar, metalden yarıiletken kısmına kontakta metal kısmında bir pozitif yüzey yükü bırakarak akarlar ve kontakta yarıiletken kısmında bir negatif yüzey yüküne neden olurlar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir.



Şekil 2.6. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontakın kontakta sonra enerji-bant diyagramı

Bir V potansiyeli uygulanırsa, bu potansiyel farkı kontak bölgesinde değil yarıiletken boyunca dağılacaktır. Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi metal kısmına pozitif bir gerilim ($+V$) ve yarıiletken kısmına negatif bir gerilim ($-V$) uygulanırsa yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket ederler.



Şekil 2.7. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant-diyagramı a) düz beslem altında b) ters beslem altında

2.1.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

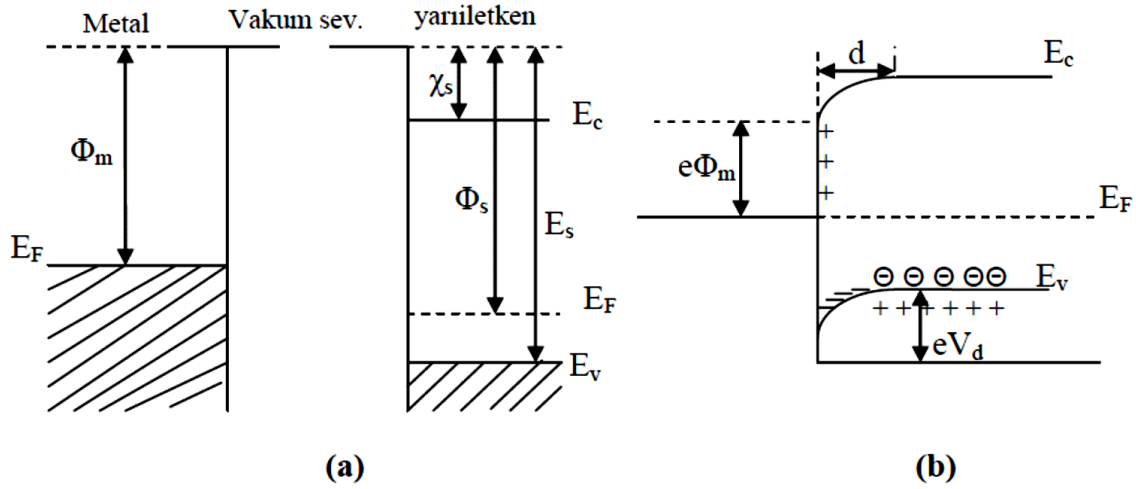
Bir metal ile bir yarıiletken, kontak haline getirildiğinde her iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı gerçekleşir. Her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar yük alışverişi devam eder. Eğer bir metal yarıiletken kontakta yük taşıyıcılar (holler) bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa bu bir doğrultucu kontakdır. Doğrultucu kontakta bir doğrultudaki akım diğer doğrultuya göre daha kolay geçer. Burada Φ_m metalin iş fonksiyonu ve Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, doğrultucu kontak olması durumunda $\Phi_s > \Phi_m$ şartı sağlanmış demektir.

Kontak yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden Şekil 2.8.a'da görüldüğü gibi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontak yapıldıktan sonra ise Şekil 2.8.b'deki gibi metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir. Bundan dolayı yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içerisinde dağılırlar. Yarı iletken kısmındaki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken kısmındakideşikler için yüzey engeli,

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.2)$$

Burada V_{dif} difüzyon potansiyelidir. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği ise;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (2.3)$$

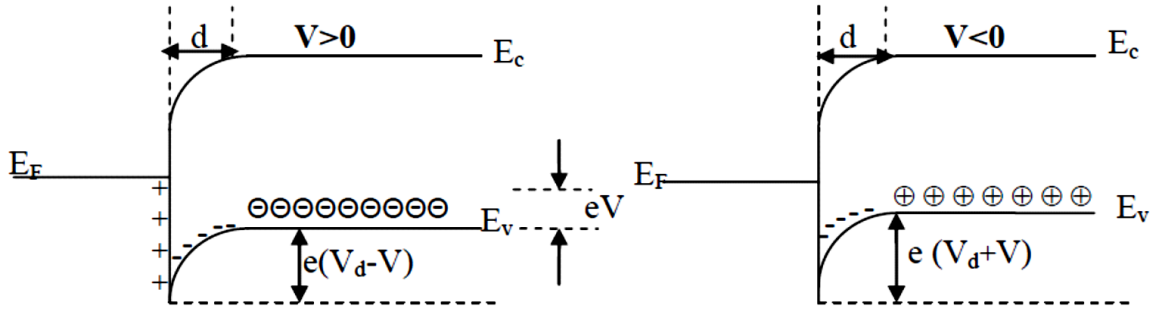


Şekil 2.8. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın (a) kontak öncesi ve (b) kontak sonrası ve termal dengede enerji-bant diyagramı

Termal uyarımlardan dolayı yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşarak metalin içine geçecek kadar enerji kazanırlar ve aynı şekilde metalin içinde termal olarak oluşan bazı hollerde yarıiletkenin içine potansiyel engelini aşarak geçecek kadar enerji kazanırlar. Böylece termal dengede kontakta, engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur. Şekil 2.9.'da $V \neq 0$ durumu için metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji-bant diyagramı görülmektedir. Ancak yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletkene doğru akan boşluk akımı değişmez ve yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşeceğinden yarıiletkenden metale geçen boşluklar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Bunun sonucu olarak yarıiletkenden metale doğru akan akım $\exp\left(\frac{kT}{eV}\right)$ çarpanı kadar azalır. Yarıiletkenden metale doğru olan akım pozitif kabul edilirse bu durumda oluşan karakteristik akım ifadesi,

$$I = I_0 \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (2.4)$$

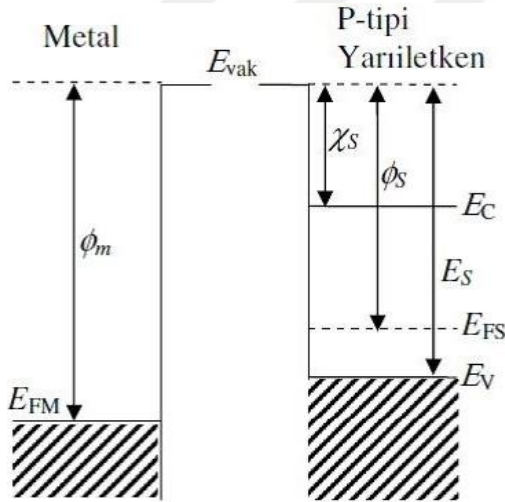
Burada I_0 doyma akımıdır. Bu bir doğrultucu kontak.



Şekil 2.9. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $V \neq 0$ olması durumunda enerji-bant diyagramı

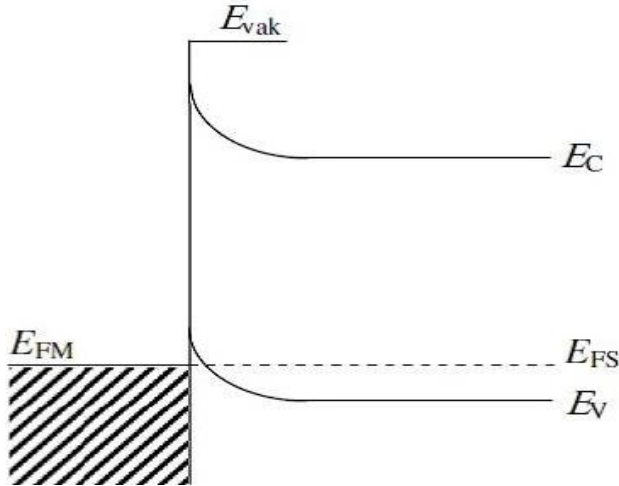
2.1.4. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir kontak şeklidir. Bu durum metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu $\Phi_m > \Phi_s$ durumda gerçekleşir. Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır.



Şekil 2.10. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağın kontakta önce enerji-bant diyagramı

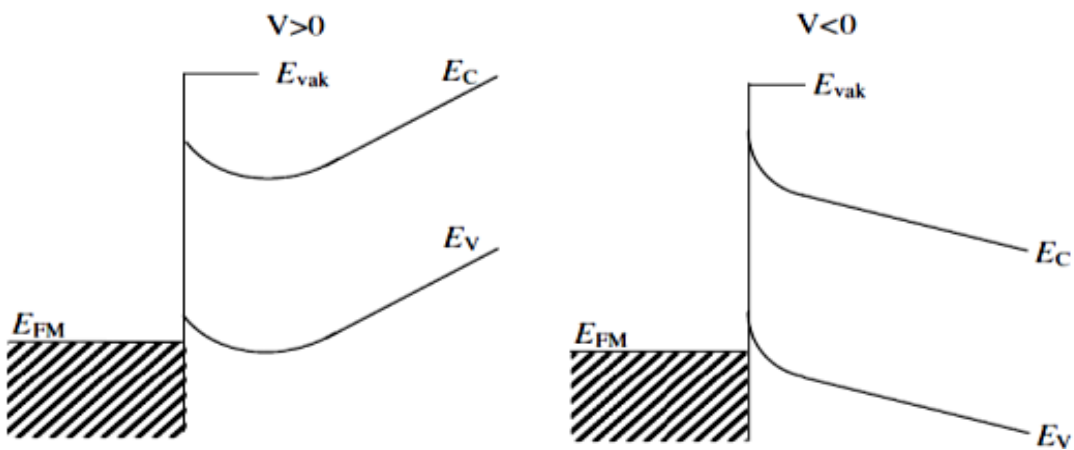
Kontaktan sonra, bir yük alışverişi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü bırakarak metal tarafına akacaklar ve metal tarafında bir negatif yüzey yüküne neden olacaklardır. Bundan dolayı yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer.



Şekil 2.11. Metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontağın kontakktan sonra enerji-bant diyagramı

Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla *p*-tipi olur. Ayrıca yapıya V voltajı uygulandığında, bu potansiyel farkı tüm yarıiletken bölge boyunca dağılır ve elektronlar herhangi bir zorlukla karşılaşmadan engeli geçebilirler.

Şekil 2.12.'de metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontağın $V \neq 0$ durumunda enerji-bant diyagramı görülmektedir. Doğru beslem durumunda, elektronlar, metalden yarıiletkene doğru kolayca hareket edebilirler ve yarıiletken tarafındaki boşluklarda metale doğru rahatlıkla akabilir. Metal tarafına geçen holler, yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralle olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan boşluklar da kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu şekilde hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru kolaylıkla akım geçebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinir.

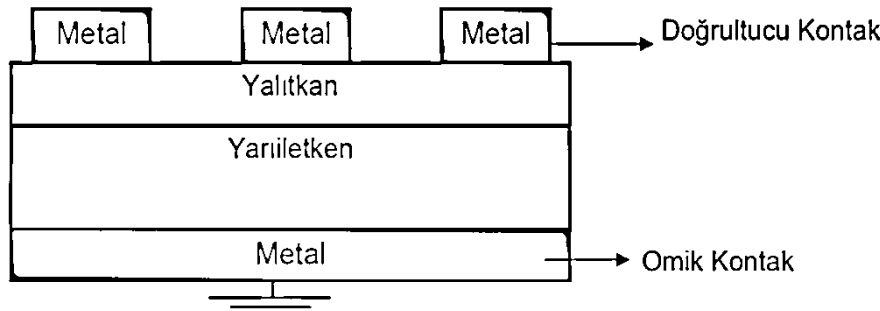


Şekil 2.12. Metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontağın $V \neq 0$ durumunda enerji-bant diyagramı:

2.2. İdeal MIS Yapısı

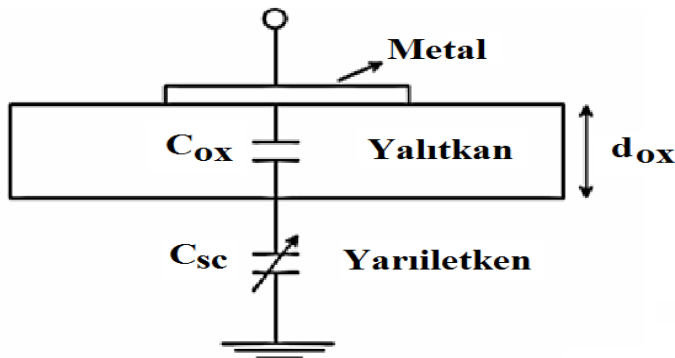
Metal ile yarıiletken arasında bazen kendiliğinden, bazende isteyerek yalıtkan bir tabaka oluşur. Böyle yapılar genelde metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapıları olarak isimlendirilir. Bu yapılar yarıiletken yüzeylerini, diğer bir deyimle yüzey durumlarını incelemek için çok yararlıdır. MIS yapılar genelde silisyum bir alt tabaka, bu alt tabakaya kontak yapılmış bir arka omik kontak ve bir oksit (yalıtkan) tabakası üzerine yer alan bir metal kontakten oluşur. MIS yapılar, elektriksel özellikleri yönünden kapasitörlere benzemektedir. Bunun nedeni, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakadır. Bu yalıtkan ara yüzey tabaka metali ile yarıiletkeni birbirinden izole eder ve metal yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenler.

Şekil 2.13.'te ideal bir MIS yapının şekli görülmektedir.



Şekil 2.13. İdeal MIS Yapısı

Metal ve yarıiletken tabaka arasında bulunan yalıtkan veya organik ara yüzey tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Oluşan bu kapasitansa MIS kapasitansı denilmektedir. Şekil 2.14.'te MIS kapasitansının eşdeğeri verilmiştir.



Şekil 2.14. MIS kapasitansının eşdeğeri devresi

MIS yapılar saydam (şeffaf) iletken teknolojisinde kullanılırlar. Saydam iletken malzemeler, elektrik iletken ve optik geçirgen yapıya sahiptirler. İndinyum Tin Oksit, Cadminyum Tin Oksit, Çinko Oksit v.s kullanılan bazı malzemelere örnek verilebilir.

İdeal MIS yapılar aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Herhangi bir gerilim uygulanmadığı zaman metalin iş fonksiyonu Φ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s arasındaki fark sıfırdır.
- D.C. beslem şartları altında yalıtkanın öz direnci sonsuzdur. Yani yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur.
- Herhangi bir beslem durumunda, yapıdaki yükler yalıtkan ile bitişik, metal yüzeyindekiler ile yarıiletkendekiler eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.
- İdeal bir MIS yapıda, metal elektroda gerilim uygulanırsa yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir.

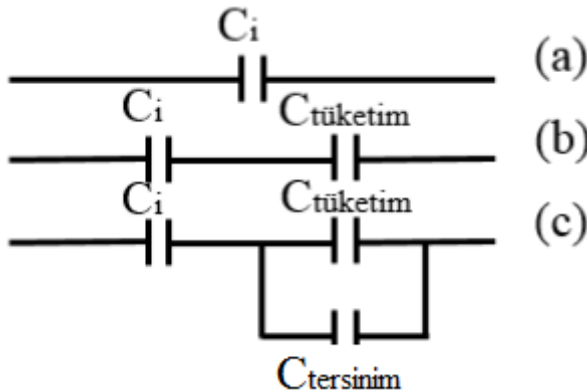
MIS eşdeğer devrenin toplam kapasitansı ($C_{ox} = C_i$) alındığında,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_{sc}} \quad (2.5)$$

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d_{ox}} A \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Bağıntıda ϵ_i yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, A doğrultucu kontağın alanı ve d_{ox} ise ara yüzey tabakanın kalınlığıdır [32,33]. İdeal bir MIS diyotta Şekil 2.15.'te görüldüğü gibi üç eşdeğer devre söz konusudur. Bu sistemler yığılma veya toplanma (accumulation), tüketim (depletion) ve tersinim (inversion) adını alır.



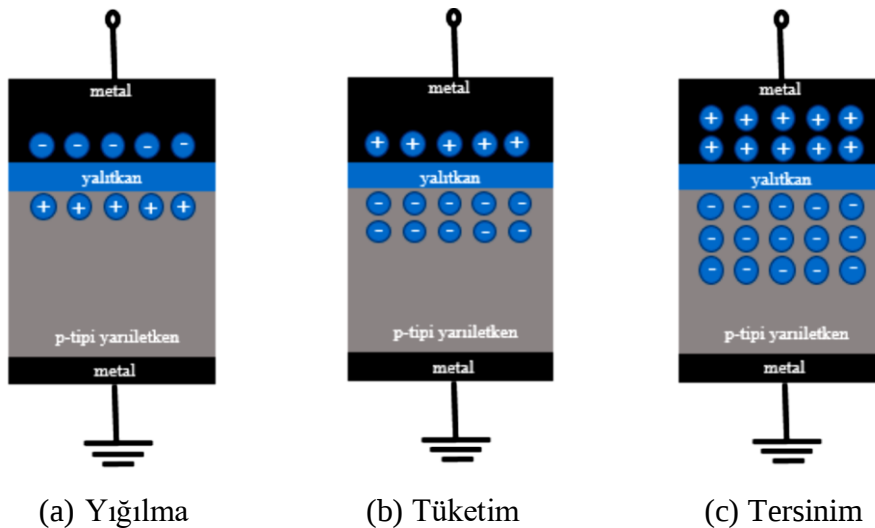
Şekil 2.15. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması (a) yığılma (b) tüketim (c) tersinim

2.2.1. Yığılma

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapının metal elektroduna negatif gerilim uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşlukları yarıiletken ara yüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.15.a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olan boşlukların yığılmasına sebep olur. Değerlik bandının yarıiletken ara yüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların ara yüzeyde birikmelerinden dolayı "yığılma" adı verilir. Bu durumda ara yüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{SC \rightarrow \infty}$ C dolayısıyla eşdeğer kapasite $C \rightarrow C_{ox}$ olur.

2.2.2. Tüketim

Metal/yalıtkan/p-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal elektrotuna küçük bir pozitif gerilim uygulandığı zaman yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken ara yüzeyindeki boşlukları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindeki boşluk yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındaki boşluk yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen W genişliğinde bir bölgede, boşlukların azaldığı bir tüketim bölgesi oluşur. Boşlukların azaldığı bu bölgeye tüketim bölgesi, bu olaya "tüketim" olayı denir (Şekil 2.15.b).



Şekil 2.16. Yığılma, tüketim ve tersinim durumlarında MIS yapıdaki yüklerin dağılımı

2.2.3. Tersinim

Metal/yalıtkan/*p*-tipi yarıiletken (MIS) yapısının metal elektrotuna daha büyük pozitif bir gerilim uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi (E_i), Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu boşluk yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra *p*-tipi yarıiletken yüzeyi *n*-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu olay, yarıiletken yüzeyinin tersinimi olarak adlandırılır (Şekil 2.15.c). Böyle bir durumda MIS kapasitesini, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin ac sinyalinin takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu ac sinyalinin küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasite artan gerilimle yalıtkan kapasite değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasite C 'ta kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden-birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C 'ın altında değerler almasına sebep olur.

2.3. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

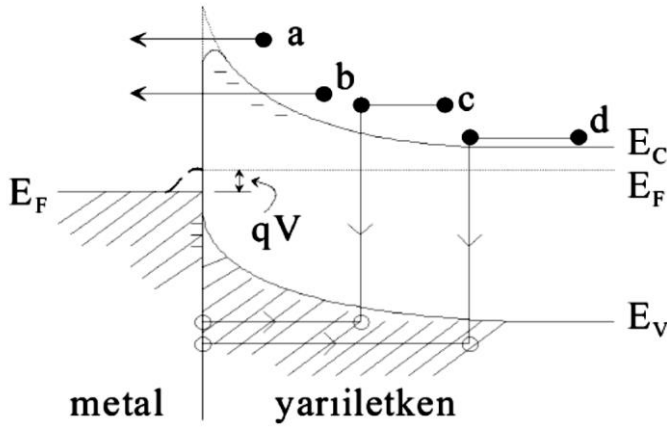
Metal/yarıiletken kontakların veya diğer adıyla Schottky diyotların bir dış elektrik alan altındaki akım-iletim mekanizmalarının belirlenmesi çok önemlidir. Kontakta ara yüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan veya polimer tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi gibi faktörlerin Schottky diyotlara etkisini dikkate alarak, hangi durumda hangi iletim mekanizmasının etkili olacağını belirlemek oldukça zordur. Ancak MS ve MIS yapılı kontaklarda başlıca akım-iletim mekanizmaları aşağıdaki gibi sıralanabilir [32,33]:

Termoionik emisyon teorisi (TE)

- Difüzyon teorisi
- Termoionik emisyon-difüzyon teorisi (TED)
- Kuantum mekaniksel tünelleme (termoionik alan emisyonu (TAE), alan emisyonu (AE) ve çok katlı tünelleme)
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon

- Elektron veya deşik enjeksiyonu
- T_0 etkili akım iletimi
- Gaussian dağılımı

Şekil 2.17.'de doğru ön-gerilim altında metal/*n*-tipi yarıiletkende dört tane temel akım-iletim mekanizması gösterilmiştir. Bunlardan (a); potansiyel engelin tepesini yeteri kadar termal enerji kazanarak aşan elektronların iletimi (TE), (b); elektron için kuantum mekaniksel tünelleme (TAE veya AE) ki bu mekanizma yüksek katkılanmış ($N_d \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletkenler ve düşük sıcaklıklar için bir modeldir, (c); Uzak yük bölgesinde birleşme (yüksek katkılı yarıiletkenler ile çoğu omik kontaklar için uygun bir model) ve (d); doğal bölgede enjeksiyon mekanizmasını ifade eder.



Şekil 2.17. Metal/yarıiletken kontaklarda doğru ön-gerilim altındaki akım-iletim mekanizmaları

2.3.1. Schottky diyotlarda termoiyonik emisyonla akım iletimi

Taşıyıcıların sahip oldukları termal enerjiden dolayı sıcak bir yüzeyden salınması olayına termoiyonik emisyon denilmektedir. Metal/yarıiletken kontaklarda termoiyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletken metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Orta derecede katkılanmış bir yarıiletken için bu süreç taşıyıcı iletimine önemli oranda katkıda bulunur. Metal/yarıiletken kontağa bir gerilim uygulandığında metal ve yarıiletkendeki Fermi seviyeleri artık aynı hizada olmayacak ve termal olarak uyarılmış elektronlar engelin diğer tarafına geçeceklerdir. Yarıiletken tarafındaki elektronlar için engel yüksekliği, uygulanan gerilime göre değişir. Doğru beslem altında elektronlar için engel yüksekliği azalacak ve bu sayede

yarıiletken den metale doğru olan akım artacaktır. Ters beslem durumunda ise engel artacak ve yarıiletken den metale doğru olan akım azalacaktır. Metaldeki elektronların göreceği potansiyel engel uygulanan gerilimle önemli oranda değişmez, dolayısıyla metalden yarıiletken e doğru olan akım hemen hemen aynı kalır (Rhoderick 1988).

Termoiyonik emisyon, metal/*n*-tipi yarıiletken yapılar da çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlar, metal/*p*-tipi yarıiletken yapılar da ise çoğunluk taşıyıcıları olan boşluklar tarafından sağlanır. Bu teoriye göre kontağın potansiyel engeli kT ısısal enerjiden büyük ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarını ise çok küçük olarak kabul eder.

Termoiyonik emisyon teorisinin varsayımları şu şekilde tanımlanır.

- Potansiyel engelinin yüksekliği, kT/e termal enerjisinden çok büyük bir değere sahiptir.
- Eklem bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının olmadığı düşünülür. Bu da taşıyıcıların ortalama serbest yollarının eklem bölgesinin kalınlığından daha fazla olduğunu ifade eder.
- Engelde görüntü yükünün etkisi ihmal edilmekte ve engelde oluşan akımlar engel yüksekliğine çok fazla bağlı olmamaktadır.
- Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletken den metale doğru akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızları,

$$J_{y \rightarrow m} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} eV_x dn \quad (2.7)$$

şeklinde olur. Burada V_x , xy yönelimindeki taşıyıcı hızı ve $E_F + q\Phi_B$ metale termoiyonik emisyon için gerekli olan minimum enerjidir. $J_{y \rightarrow m}$ denklemde de görüldüğü gibi potansiyel engelini geçebilmek için yeterli termal enerjiye sahip elektronların konsantrasyonuna ve bu elektronların hızlarına bağlıdır. Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu dn ,

$$dn = N(E)f(E)d(E) = \left[\frac{4\pi(2m)^{3/2}}{h^3} \right] \sqrt{E - E_c} \exp \left[\frac{-(E - E_c + eV_n)}{kT} \right] dE \quad (2.8)$$

şeklinde verilir. Bu denklemde $N(E)$ ve $f(E)$ sırasıyla bu bantlardaki durumların yoğunluğu ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur, $eV_n = E_c - E_f$ ve m^* elektronun etkin

kütlesidir. İletim bandındaki elektronların tüm enerjilerinin kinetik enerji olduğu varsayımından yola çıkarak

$$E - E_C = \frac{1}{2} m^* v^2 \quad (2.9)$$

Yazılabilir. Bu eşitlikten $d(E)$ ve $\sqrt{E - E_C}$ elde edilir.

$$d(E) = m^* v dv \quad (2.10)$$

$$\sqrt{E - E_C} = v \sqrt{\frac{m^*}{2}} \quad (2.11)$$

2.19, 2.10 ve 2.11 eşitlikleri 2.8'de yerine konursa;

$$dn = 2 \left[\frac{m^3}{h} \right] \exp \left[\frac{-eV_n}{kT} \right] \exp \left[\frac{-m^* v^2}{2kT} \right] 4\pi v^2 dv \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu eşitlik bütün yönlerde birim hacim başına hızları $v - (v + dv)$ arasında değişen elektronların sayısıdır. Eşitlik 2.12, eşitlik 2.7 yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$J_{y \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-eV_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m^* v_{0x}^2}{2kT} \right) \quad (2.13)$$

elde edilir. Burada v_{0x} , x yönünde engeli aşmak için gerekli eşik hız değeridir ve

$$\frac{1}{2} m^* v_{0x}^2 = e(V_d - V) \quad (2.14)$$

olur. 2.14. eşitliği 2.13'da yerine konulursa,

$$J_{y \rightarrow m} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_B}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.15)$$

elde edilir.

Buradaki A^* Richardson sabiti;

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir. Metal/yarıiletken doğru belsemde iken engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu uygulanan voltajla exponansiyonel olarak artacaktır. Metalden yarıiletken giden elektronlar için engel yüksekliği uygulanan voltajla değişmediğinden akım uygulanan voltajdan bağımsızdır. Böylece Termal denge durumunda, yarıiletken metale ve metalden yarıiletken doğru olan akım yoğunlukları eşit olur ve toplam akım yoğunluğu ifadesi $J_n = J_{y \rightarrow m} + J_{m \rightarrow y}$ iki akım yoğunluğunun toplamı olur. Burada metalden yarıiletken toplam akım yoğunluğu,

$$J_{y \rightarrow m} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.17)$$

olur ve toplam akım yoğunluğu ise 2.20. ve 2.18. eşitlikleri kullanılarak;

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

elde edilir. Buradaki J_0 ifadesi sızıntı akımı olarak da bilinen doyma akım yoğunluğudur ve;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Sonuç olarak doyma akım yoğunluğu,

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

şeklinde yazılır.

2.4. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkileri

Engel yüksekliğini tüketim tabakasındaki elektrik alana bağlayan etkilerden biri imaj kuvvet engel alçalmasıdır. Bu olaya Schottky etkisi ya da Schottky engel alçalması da denilir. Bu etki ara yüzey oksit tabakanın varlığına bağlı değildir. Yani bir tabaka mevcut değilken meydana gelir. Bir elektron metalden bir x uzaklığında ise metal yüzeyinde bir pozitif yük indüklenenecektir. Elektron ve indüklenmiş pozitif yük arasındaki çekim kuvveti elektrona $-x$ uzaklıkta yerleşmiş bir pozitif yük arasındaki kuvvete eşit olacaktır. Bu pozitif yük imaj yükü ve aradaki çekim kuvveti de imaj kuvveti olarak tarif edilir. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen imaj kuvveti aşağıdaki gibidir.

$$F_x = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2} = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0x^2} \quad (2.21)$$

Burada ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabitidir. Elektron negatif bir potansiyel enerjiye sahip olduğu için bu potansiyel enerji engel yüksekliğine eklenir. Bir dış E elektrik alanı uygulandığında toplam potansiyel enerji PE , uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki toplam olarak verilir.

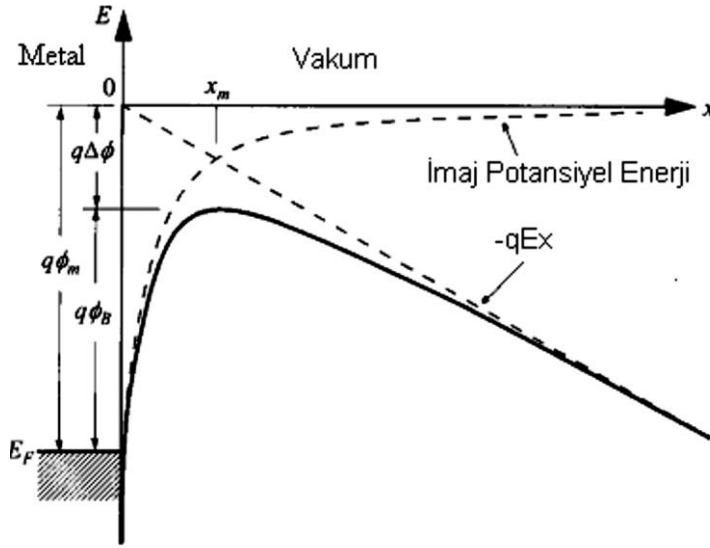
$$PE = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0x} + eE_x \quad (2.22)$$

Schottky engel düşmesi Δ_Φ ve bu düşmenin gerçekleştiği uzaklık $\frac{x_m dPE(x)}{dx} = 0$ şartında;

$$x_m = \sqrt{\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0E}} \quad (2.23)$$

$$\Delta_\Phi = \frac{eE}{4\pi\epsilon_0} = 2Ex_m \quad (2.24)$$

Şekil 2.18.'de görüldüğü gibi Schottky engel düşmesi yüksek alanlarda oldukça azalır ve buna paralel olarak akım iletim mekanizmaları da değişir.



Şekil 2.18. Bir metal yüzeyi ile vakum arasında enerji-bant diyagramı

Elektrik alan arayüzeydeki max bir alanla ($E_{\max}$) boşluğun dielektrik sabiti ϵ_0 ise yarıiletkenin dielektrik sabiti ϵ_s metal yarıiletken kontaklar için yer değiştirirse,

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE_{\max}}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.25)$$

elde edilir. Burada ϵ_s değeri yarıiletkenin durgun dielektrik sabitinden farklıdır. Emisyon süreci boyunca elektronun metal/yarıiletken arayüzeyindeki max engeli geçiş süresi dielektrik gevşeme zamanından daha kısa ise yarıiletken ortası yeterli polarizasyon zamanına sahip olamaz ve durgun permitiviteden daha küçük bir permitivite beklenir. Si için bilinen permitivite değerleri durgun permitivite değerleri ile aynıdır.

2.5. Engel Yüksekliği Ölçme Yöntemleri

2.5.1. Akım-gerilim (I-V)

Schottky diyotlarında düz beslem çok büyük olmadıkça, akım-iletim kuramı termiyonik emisyon (TE) kuramına uyar. Bu kurama göre, akım-gerilim bağılılığı,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

bağıntısıyla verilir. Burada;

$$I_0 = AA^{**}T^2 \exp \left[\frac{-q(\Phi_{b0} - \Delta\Phi_b)}{kT} \right] \quad (2.27)$$

şeklinde verilen doyma akımıdır. Burada $\Phi_{b0} - \Delta\Phi_b$ etkin engel yüksekliğidir ve Φ_e ile ifade edilir. A^{**} ve A ; engeli geçen elektronların kuantum mekanik yansımaları, metal yüzeyi ile engel tepesi arasındaki elektronların fonon saçılması dikkate alınarak düzenlenmiş etkin Richardson sabiti ve kontak alanıdır. Pratikte üretilen diyotlar için I - V belirtkeni bağıntı 2.27'deki ideal durumdan önemli sapmalar gösterebilir ve bu durumda akım ifadesi,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (2.28)$$

sekinde verilir. Burada n gerilime ve sıcaklığa bağlı olan ve değeri 1'den büyük olan ideallik faktörüdür. İdeallik faktörünün 1'den büyük olmasının birçok nedeni vardır ve bunlardan en çok karşılaşılanı Φ_{b0} ve $\Delta\Phi_b$ 'nin gerilime bağlı olmasıdır. Bağıntı 2.28, $V > 3 kT/q$ için için;

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (2.29)$$

yazılabilir.

2.5.2. Kapasite-gerilim (C-V)

Ters beslemde kapasite ifadesi,

$$C = A \left(\frac{qN_a\epsilon_s}{2} \right)^{1/2} \left(\Phi_b - V_p + V_R - \frac{kT}{q} \right)^{-1/2} \quad (2.30)$$

ile verilir. Burada V_R ve V_p sırasıyla ters beslem gerilimi ve Fermi seviyesi ile yarıiletkenin değerlik bandı arasındaki farktır. Bu ifade C^{-2} için çözülür ve yazılırsa,

$$C^{-2} = \left(\frac{2}{eN_a \epsilon_s} \right) \left(\Phi_b - V_p + V_R - \frac{kT}{q} \right) \quad (2.31)$$

elde edilir. Bir ara yüzey tabakası yoksa (Φ_b, V_R 'den bağımsız) C^{-2} - V_R grafiği, bir doğru verir. Bu doğrunun yatay eksenini kestiği nokta ile $\Phi_b - V_p - kT/q$ bulunur. Buradan da engel yüksekliği,

$$\Phi_b = V_0 + V_p - \frac{kT}{q} \quad (2.32)$$

olarak bulunur.

2.6. Cheung Fonksiyonları

Seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi diyot parametrelerinin bulunabilmesi için birkaç yöntem vardır. Bunlardan biri Cheung tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır [34]. Uygulanan gerilimin tümü diyot üzerine düşmediğinden, ideal durumdan bazı sapmalar söz konusudur. Buna göre Bağıntı 2.29 ile verilen bağıntıya seri direnç etkisi de ilave edildiğinde akım ifadesi,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) \quad (2.33)$$

şeklinde verilir. Burada IR_s uygulanan gerilimin seri direnç üzerine düşen kısmıdır. Denklem 2.33'nin logaritması alınıp gerekli düzeltmeler yapılırsa,

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.34)$$

elde edilir. Bağıntı 2.43'ün $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınırsa,

$$\left(\frac{dV}{d \ln(I)} \right) = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (2.35)$$

elde edilir. Potansiyel engel yüksekliğini bulmak için

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_0}{AA^* T^2} \right) \quad (2.36)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. Denklem 2.34 ve 2.35'ten faydalanarak

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.37)$$

denklem 2.37'den $H(I)$ - I 'nin grafiği bir çizgisel doğru verir. Bu doğrunun eğiminden seri direnç ve düşey eksen kestiği noktadan da Bağıntı 2.35'te bulduğumuz ideallik faktörü değeri yerine yazılarak engel potansiyeli hesaplanabilir.

Ayrıca seri direnç C - V ölçümlerinden de hesaplanabilir [35]. Bu yöntemde seri direnç, kuvvetli yığılma bölgesinde elde edilen kapasite ve iletkenlik ($1/R$) (konduktans) değerlerinden

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (wC_{ma})^2} \quad (2.38)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada C_{ma} ve G_{ma} kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasite ve iletkenlik değerleridir.

2.7. Ara Yüzey Durumları

Bir metal/yalıtkan/yarıiletken yapısı için ara yüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı, bu yapının ölçülen ideal elektriksel belirtkenlerini etkiler (Nicolian and Brews 1982). Yüzey durumları (N_{ss}) yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyde bulunur. Bunlar oksit yapısındaki hareketsiz yükler ile ısısal olarak uyarılmış ve elektrik alan içinde hareketli iyonlar tarafından meydana gelir. Bunlar MIS yapısının kapasitesine etki etmez. Hızlı yüzey durumları ise, yalıtkan/yarıiletken ara yüzey yakınında yer alır ve yarıiletkenin yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi, diğer bir deyimle yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik ve değerlik bandı ile ani yük alışverişi yapar.

3. MATERİYAL VE METOT

3.1. Giriş

Bu bölümde Al/ZnO/p-Si, çinko-oksit (ZnO) hakkında genel bilgiler, Schottky diyotlarının yapımında kullanılacak malzemeler, numunelerin hazırlanmasında takip edilecek işlemler ile numunelerin temizlenmesi, üretimi ve hazır hale getirilmesi anlatılmaktadır. Aynı zamanda laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen I-V ve C-V ölçümlerinin analizi de belirtilmektedir. Diyotlar ve yarıiletken malzemenin elektriksel olarak incelenmesine yönelik gerekli yöntemler ile hesaplarda kullanılan parametreler de bu bölümde yer almaktadır.

3.2. ZnO'nun Genel Özellikleri

Çinko oksit, formülü ZnO olan inorganik bir bileşiktir. Kristal yapıdaki oksijen eksikliği *n*-tipi yarıiletken özelliği göstermesine neden olur. Görünüm olarak beyaz pudra görünümündedir ve kokusuzdur. Biyomalzeme özelliği taşımasından dolayı kozmetik endüstrisinde de kullanılmaktadır. ZnO, akustik dalga cihazları, kimyasal sensörler, iletkenlik elektrotları, güneş pilleri ve fotoelektrik cihazlar, ısı aynaları, düz panelli diyotlar ve mikro cihazlar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, televizyon tüpleri, floresan lambaları için fosfor üretiminde de yarıiletken olarak kullanılır. ZnO doğada mineral çinko taşı olarak bulunmaktadır. Ancak, ticari amaçla kullanılan ZnO genellikle sentetik olarak üretilmektedir.

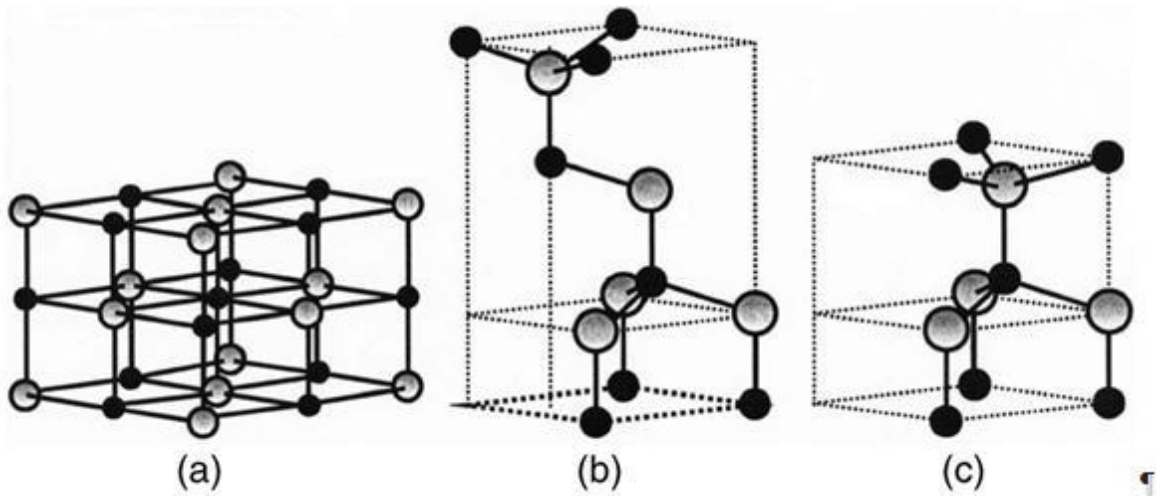
Periyodik tabloda, çinko II. gruba, oksijen VI. gruba ait olduğundan malzeme biliminde ZnO genellikle II-VI grubu yarıiletken olarak adlandırılmaktadır. ZnO'nun bazı önemli ve avantajlı özelliklerinden en önemlileri, elektron mobilitesinin yüksek olması, geçirgenliğinin iyi olması, geniş bant aralığına sahip olmasıdır. ZnO genellikle ince film transistör ve ışık yayan diyotlarda kullanılırlar.

ÖZELLİKLER	
Moleküler Formülü	ZnO
Yoğunluk	5.606 g/cm ³
Erime Noktası	1975 °C
Kaynama Noktası	2360 °C
Bant Aralığı	3.3 eV
Kırılma İndisi	2.0041
Kristal Yapı	Wurtzide
300 K' deki Örgü Parametreleri	
a_0	0,32495 nm
c_0	0,52069 nm
a_0/c_0	1,602
Statik Dielektrik Sabiti	8,656

Çizelge 3.1. ZnO'nun çeşitli özellikleri

3.2.1. Kristal yapısı

Çinko oksit üç farklı kristal formunda ortaya çıkmaktadır. Bunlar, hekzagonal (vürtzit), kübik çinko sülfür (cubic zinc blende) ve nadiren kübik kaya tuzu olarak gözlenmektedir. Vürtzit yapısı ortam koşullarında en kararlısıdır ve dolayısıyla en yaygın olanıdır. Zinc blende formu, ZnO'nun kübik örgü yapısına sahip alt taban üzerine büyütülmesiyle kararlı hale getirilebilir. Her iki durumda çinko ve oksit merkezleri tetrahedraldir. Kaya tuzu yapısı (NaCl tipi) sadece 10 GPa civarındaki yüksek basınçta gözlenir. Şekil 3.1.'de ZnO'nun kristal yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.1. ZnO'nun kristal yapılarının gösterimleri (a) Kaya tuzu, (b) Zincblende, (c) Hekzagonal vürtzit [36]

Hekzagonal ve zincblende çok kristalleri inversiyon simetrisine sahip değildirler. Bu ve diğer örgü simetri özellikleri hekzagonal ve zinc blende ZnO'nun piezoelektrik özellik göstermelerine ve hekzagonal ZnO'nunda piroelektrik özellik göstermesine neden olur.

Hekzagonal yapı 6 mm $\text{\AA}$ nokta grubuna veya C_{6v} 'ye sahiptir ve uzay grubu $P6_3mcC_{6v}^4$ 'tür. Örgü sabitleri $a=3.24 \text{ \AA}$ ve $c=5.2 \text{ \AA}$ 'dur. Bunların oranı olan $c/a \sim 1.60$ değeri, hekzagonal hücrenin ideal değerine ($c/ca=1.633$) yakındır. Çoğu II – VI grup materyallerinde olduğu gibi, çinko oksitteki bağlanma da çoğunlukla iyoniktir ve bu da çinko oksitin neden iyi piezoelektrik özelliği gösterdiğini açıklamaya yetmektedir. Polar Zn-O bağlarına bağlı olarak, çinko ve oksijen düzlemleri elektrik yükleri (sırasıyla, pozitif ve negatif) taşırlar. Dolayısıyla, elektriksel nötralliğin sürdürülmesi için, bu düzlemler birçok ilgili materyallerde atomik düzeyde yeniden düzenlenir. Fakat çinko oksitte bu durum gerçekleşmemektedir. Onun yüzeyleri atomik olarak düzgün, kararlı ve yeniden düzenlenme sergilemezler. ZnO'daki bu anormallik henüz tam olarak açıklanamamıştır .

3.2.2. Mekanik özellikler

ZnO göreceli olarak mohs skalasında yaklaşık 4.5 sertlikle birlikte yumuşak bir materyaldir. ZnO'nun elastik sabitleri, GaN gibi III – VI grubu yarıiletkenlerle kıyaslandığında daha küçüktür. Yüksek ısı kapasitesi ve iletkenliği, düşük ısısal genişmesi ve yüksek erime sıcaklığı ZnO'yu seramikler için faydalı kılmaktadır. ZnO'nun, tetrahedral olarak bağlanmış yarıiletkenler arasında en yüksek piezoelektrik tensöre sahip olduğu belirlenmiştir ve GaN ve AlN ile kıyaslanabilmektedir. Bu özellik onu, büyük bir elektromekaniksel kuplaj gerektiren birçok piezoelektrik uygulamaları için teknolojik olarak önemli bir material yapmaktadır.

3.2.3. Elektriksel özellikler

ZnO oda sıcaklığında geniş bant aralığına (3.3 eV) sahip bir materyaldir ve bundan dolayı saf ZnO renksiz ve geçirgendir. Yüksek bant aralığıyla ilgili avantajlar, daha yüksek kırılma voltajı, büyük elektrik alanlara dayanma kabiliyeti, daha düşük elektronik gürültü, yüksek sıcaklık ve yüksek güç etkinliklerini içerir. ZnO'nun bant aralığı, magnezyum oksit ve kadmiyum oksit ile alaşım yapılarak bir başka değere ($\sim 3-4 \text{ eV}$) ayarlanabilir. ZnO, bilinçli bir şekilde katkılanmadan bile genellikle *n*-tipi karaktere sahiptir. Kontrol

edilebilir katkılama, Zn ile Al, Ga, In gibi III. Grup elementlerinin yer değiştirmesi veya oksijen ile. VII. grup elementleri klor veya iyodun yer değiştirmesi kolayca başarılabilir. ZnO' nun güvenilir bir şekilde *p*-tipi katkılama işlemi zor olarak sürmektedir. Bu problem, *p*-tipi katkılayıcıların düşük çözünürlüğünden ve çok miktardaki *n*-tipi safsızlıklarla kompanse edilmesinden kaynaklanmaktadır. Benzer sorunlar GaN ve ZnSe'de görülmektedir. *n*-tipi bir materyalin *p*-tipi olarak ölçülmesindeki karmaşıklık, örneğin homojen olmamasından kaynaklanmaktadır. *p*-tipi katkılamadaki güncel sınırlamalar, ZnO' nun elektronik ve optoelektronik uygulamalarını sınırlamamaktadır. Bilinen *p*-tipi katkılayıcılar, I. grup elementleri, Li, Na, K; V. grup elementleri, N, P ve As'nin yanısıra, bakır ve gümüşü içermektedir. Buna rağmen, bunların çoğu derin alıcılar oluştururlar ve oda sıcaklığında kayda değer *p*-tipi iletkenlik sağlamazlar. ZnO'nun elektron mobilitesi sıcaklıkla hızla değişmektedir ve 80 K' de maksimum değere ($2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) sahip olmaktadır. Değik mobilitesi $5\text{-}30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aralığındaki değerlerle sınırlıdır.

3.3. Al/ZnO/*p*-Si Yapının Hazırlanması

Al/ZnO/*p*-Si Schottky diyotların oluşturulması için $10 \text{ }\Omega\text{cm}$ özdirençli ve $280 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlıklı, yüzeyi parlatılmış *p*-tipi (Bor katkılı) tek kristal Si altaşlar kullanıldı. Yaklaşık 2" aplı *p*-tipi Si altaşlar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (eyrek yaprak) bölündü.

3.3.1. Kristal temizleme

Bu çalışmada $280 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında ve $10 \text{ }\Omega\text{cm}$ özdirencinde bir tarafı parlatılmış diğer tarafı mat *p*-tipi Silisyum kristali kullanılmıştır. İdeale yakın bir Schottky diyotu yapabilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kristal zerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı (Resim 3.1).



Resim 3.1. Beher Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo

Si altaşın kimyasal temizleme aşamaları aşağıda sırasıyla verildi:

- Silisyum yüzeyindeki olası yağları temizlemek için ultrasonic banyoda trikloretilen dolu beherde 10 dakika titreştirildi.
- 55 dereceye kadar ısıtılmış aseton dolu beher içerisine atıldı ve ultrasonic banyoda 10 dakika bekletildi.
- Methanol dolu beher içerisine bırakıldı ve ultrasonic banyoda 10 dakika bekletildi. Buraya kadar her kimyasal temizleme aşama arasında deiyonize su sistemi (Resim 3.2) ile üretilen 18 $M\Omega cm$ özdirençli deiyonize su ile ultrasonic banyoda 5 dakika bekletildi.

Bu işlemlerden sonra silisyum kristali azot (N_2) gazı ile iyice kurutuldu. Silisyum yüzeyindeki organik ve inorganic artıkları uzaklaştırmak için, beher içerisine su (H_2O) (325 ml) + amonyum hidroksit (NH_4OH) (27% 65 ml) karışımı konularak ısıtılmıştır (Resim 3.3). Isıtılan karışıma (30%) H_2O_2 (65 ml) eklenip kabarcıklar oluşuktan sonra silisyum kristalleri oluşan yeni karışımın içinde ultrasonic banyoda 15 dakika bekletilmiştir. Daha sonra 18 $M\Omega cm$ dirençli deiyonize su ile bolca durulanmıştır. Bu esnada silisyum yüzeyinde bir miktar oksit tabakası oluşabileceğinden bu tabakanın etkisini en az düzeye indirebilmek için, teflon beher içerisindeki deiyonize suya (480ml), hidroflorik asit (HF) (20ml) eklenmiştir. Oluşan karışıma silisyum kristal konularak 2 dakika çalkalanmış, bolca deiyonize su ile durulanmış ve azot (N_2) gazı ile kurutulmuştur.



Resim 3.2. Innovation Water Purification marka deiyonize su sistemi



Resim 3.3. Kristal temizliği aşamasında kullanılan ısıtıcı düzeneği

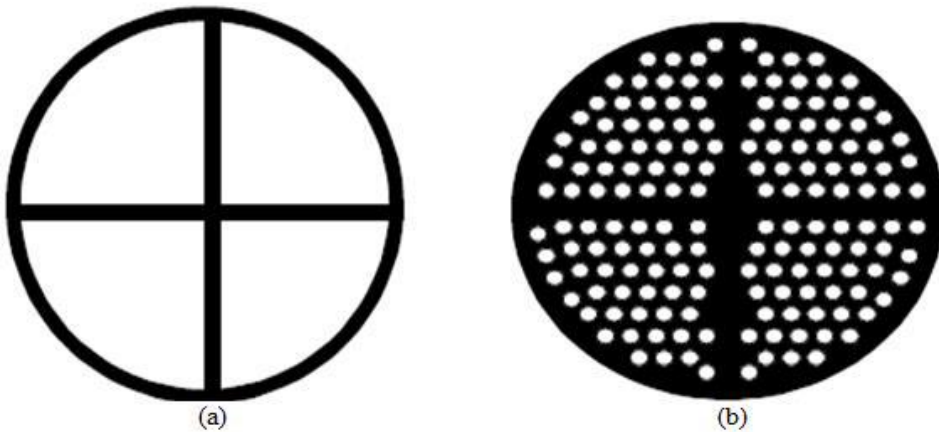
3.3.2. Al/ZnO/*p*-Si diyotların hazırlanması

Kimyasal temizlik işleminden hemen sonra, hızlı bir şekilde *p*-tipi Si kristali buharlaştırma sistemine (Resim 3.4) konulmuştur. 3.1.1. bölümünde *p*-tipi Si kristalin temizlenmesinde anlatılan ilk üç aşama, omik ve doğrultucu kontakları hazırlamak için kullanılan bütün parçaların ve metallerin temizliğinde kullanılmıştır.



Resim 3.4. Al/ZnO/p-Si Schottky diyotların hazırlanması için kullanılan “Edwards” marka buharlaştırma sistemi

Omik kontağın oluşturulması için ilk olarak bakır bir levha kullanılarak resim 3.5.’te gösterilen mekanik maskeler hazırlandı.



Resim 3.5. (a) Omik kontak maskesi (b) Doğrultucu kontak maskesi

Ohmik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Ohmik kontaklar için 500°C ısıtılmış buharlaştırma vakum sisteminde, $\approx 2 \times 10^{-6}$ Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile oldukça saf Alüminyum ($\sim 99.999\%$) buharlaştırılarak Si

yaprağın arka yüzeyine ~ 124 nm kalınlığında bir Alüminyum tabaka oluşturuldu. Daha sonra sıcaklık düşürülerek tekrar ~ 124 nm kalınlığında bir Alüminyum tabaka kaplandı. ZnO kaplamak için

- *p*-tipi silisyumun parlak yüzeyine, buharlaştırma tekniği ile 2×10^{-6} Torr altında 20nm kalınlığında ZnO (99.999%) kaplandı.
- Atmosferik şartlar altında 400°C 'de 4 dakika boyunca tavlanarak ZnO büyütüldü.

3.3.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması

ZnO kaplanmış yüzey, üzeri çok sayıda 1,3 mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi (Resim 3.5.). Flaman üzerine konulan Alüminyum metal parçası $\approx 2 \times 10^{-6}$ Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1,3 mm çaplı) şeklinde ve ≈ 128 nm kalınlığında alüminyum kaplanması sağlandı. Resim 3.6.'da gösterilen yapı elde edildi.



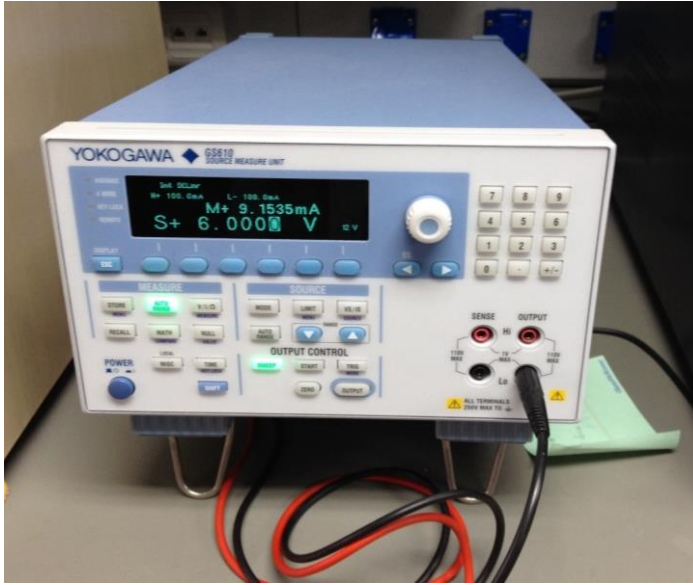
Resim 3.6. Al/ZnO/*p*-Si yapısı

3.4. Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Düzenekleri

Elektriksel karakteristikler için gerekli ölçümlerin tamamı Türkiye Atom Enerjisi Kurumu'na (TAEK) bağlı olan Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi (SANAEM) Laboratuvarında gerçekleştirildi. Oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümleri için Keithley 2400 Source Meter cihazı, kapasitans-gerilim C-V ve iletkenlik-voltaj G-V

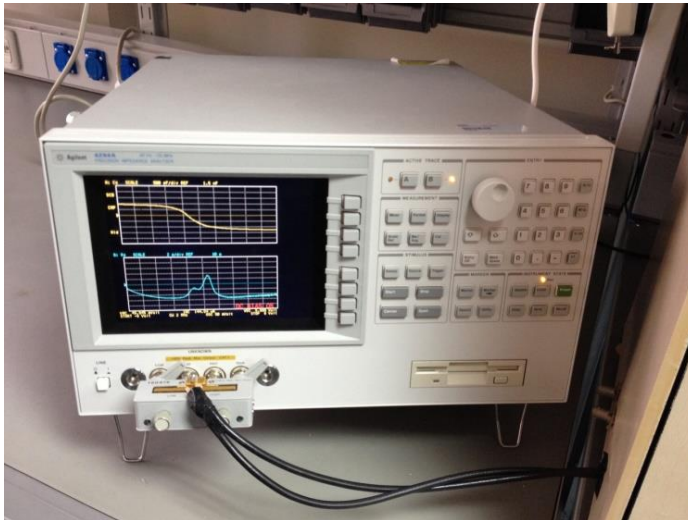
ölçümlerinde Resim 3.8.'de görülen Agilent 4294A Empedans Analizörü (40 Hz-110 MHz) kullanıldı. Ölçümler IEEE-488 ac/dc çevirici kart (GPIB) yardımıyla alındı.

Al/ZnO/p-Si Schottky diyotun, oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümleri için Yokogawa Gs610 source ölçüm cihazı (Resim 3.6.), kapasite-gerilim ve iletkenlik gerilim ölçümleri için ise HP Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer (Resim 3.7.) cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.7. Yokogawa Gs610 Source ölçüm cihazı

Resim 3.8.'de görüldüğü Agilent 4294A Empedans Analizörünün frekans sınırları 40 Hz-110 MHz olup, yüksek frekanlarda ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır.



Resim 3.8. Agilent 4294A Empedans Analizörü



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Aynı şartlar altında üretilen özdeş Al/ZnO/p-Si diyotlardan 9 tanesinin akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G-V) eğrileri yardımıyla; doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), difüzyon potansiyeli (V_d), Fermi enerjisi (E_F), tüketim tabakası genişliği (W_D), yüzey durumları (N_{ss}), Schottky alçalması ($\Delta\Phi_b$), maksimum elektrik alan (E_m) gibi diyot parametreleri elde edilmiştir. Cheung metodu kullanılarak diyotların seri dirençleri hesaplanmıştır.

4.2. Düz Beslem Akım-Gerilim Karakteristikleri

Metal/yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak oluşturulmuş yalıtkan tabaka metal/yarıiletken yapıyı metal/yalıtkan yarıiletken yapısına dönüştürür. Yalıtkan tabakanın kalınlığı, $\approx 30 \text{ Å}$ 'dan küçük ise arayüzey durumları metal ile dengede olurlar. Ancak yalıtkan tabakanın kalınlığı, $\approx 30 \text{ Å}$ 'dan büyük ise arayüzey durumları yarıiletkenle dengede olurlar [3,13]. Yani bu yapıların hem I-V hem de C-V ve G-V karakteristikleri ve dolayısıyla temel elektriksel parametreler, yalıtkan arayüzey tabakası, seri direnç ve arayüzey durumlarından büyük ölçüde etkilenirler. Ayrıca akım-iletim mekanizması yüzey hazırlama işlemleri, metalden/yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği, sıcaklık ve gerilim gibi birçok parametreye de bağlı olabilir [20,21].

Şekil 4.1. ve 4.2.'de 9 adet Al/ZnO/p-Si Schottky diyota ait sırasıyla düz ve ters beslem akım-gerilim (I-V) ve $\ln(I)$ -V karakteristikleri verilmiştir. Ölçümler -4 V ve +4 V arasında alınmıştır. Termoyonik emisyon teorisine göre, akım ve gerilim arasındaki bağıntı [9,10,37,38],

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (4.1)$$

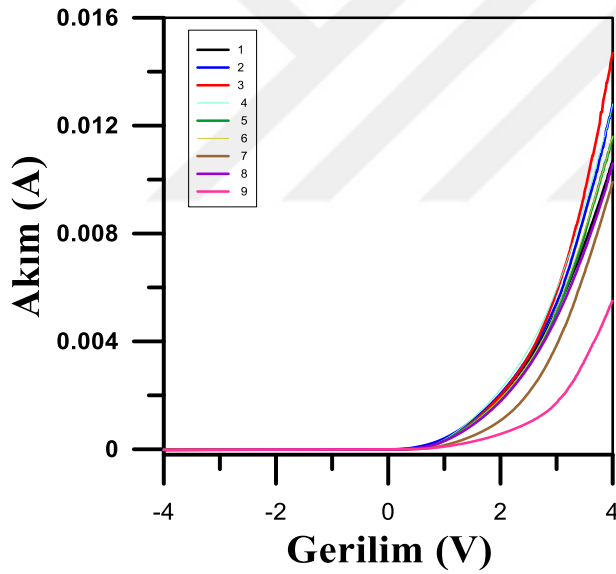
ile verilir. Burada q elektron yükünü, V diyot gerilimini, k Boltzman sabitini ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. I_0 çoğunluk taşıyıcıları için ters doyum akımı olup,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{nkT}\right) \quad (4.2)$$

ile ifade edilir. Burada A^* , A , Φ_b ve n sırasıyla Richardson sabiti, diyet alanı, Schottky engel yüksekliği ve ideallik faktörüdür. Burada ideallik faktörü ara yüzey durumlarına, uygulanan gerilime ve sıcaklığa bağlı olup, değeri 1'den büyüktür. Elde edilen yapıların ideallik faktörleri yarı logaritmik I-V eğrisinin eğiminden,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (4.3)$$

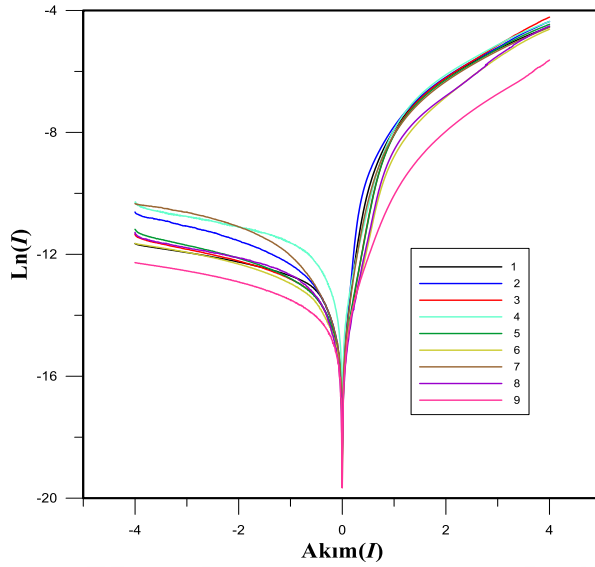
bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Tüm Al/ZnO/p-Si Schottky diyetlerinin düz beslem I-V karakteristikleri

Şekil 4.2.'de linear eğrinin akım eksenini kestiği noktadan I_0 doyma akımının değeri elde edilmiştir. Denklem 4.2 ve denklem 4.3 ifadeleri kullanılarak Φ_b ve n değerleri elde edilmiştir.

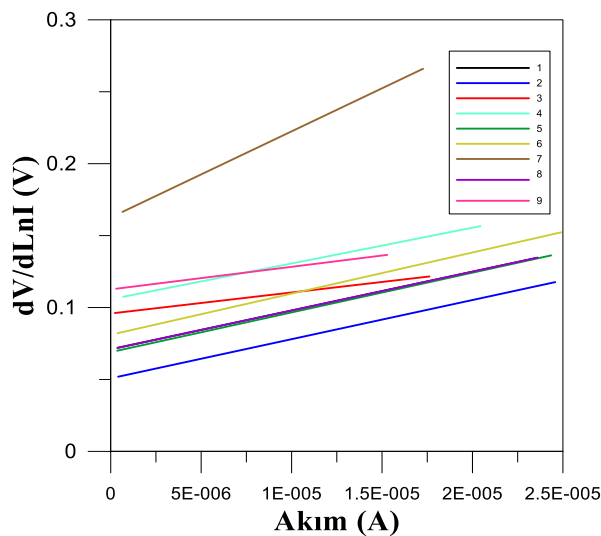
Çizelge 4.1.'de tüm diyetler için I-V eğrilerinden elde edilen I_0 , Φ_b ve n değerleri verilmiştir. Kristal yüzeyindeki diyetlerin oluşturduğu homojensizlikler nedeniyle engel yükseklikleri farklı değerler almaktadır.



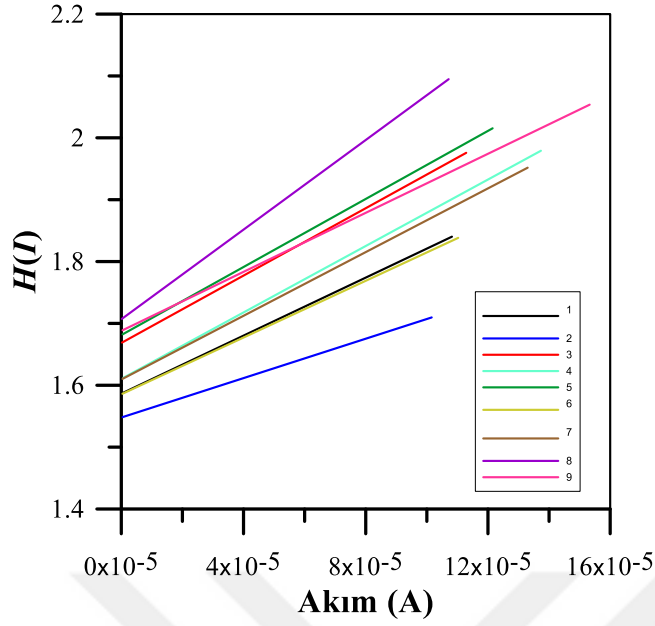
Şekil 4.2. Tüm Al/ZnO/p-Si Schottky diyotlarının yarı logaritmik düz beslem I-V karakteristikleri

Yapıların seri dirençleri sıfırdan farklı olduğu için, gerilim arttıkça $\ln I$ -V eğrilerinin yüksek gerilim değerlerinde büküldüğü görülmektedir (Şekil 4.2.). Bu değişim seri direncin (R_s) etkin olduğu bölgeye karşılık gelir. Bu yüzden R_s değerleri 9 diyot için hesaplanmış, yöntem olarak da Cheung metodu kullanılmıştır.

Cheung yöntemine göre diyotların seri dirençleri denklem (2.34) den denklem (2.37)'e kadar denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3. ve şekil 4.4.'de 9 diyot için $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I eğrileri verilmiştir. Çizilen eğrilerin düşey ekseni kestiği noktadan ideallik faktörleri (n), doğruların eğiminden ise seri direnç (R_s) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Tüm Al/ZnO/p-Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln(I)$ - I eğrileri



Şekil 4.4. Tüm Al/ZnO/p-Si Schottky diyotlarının H(I)-I eğrileri

Çizelge 4.1. Al/ZnO/p-Si Schottky diyotlarının I-V ölçümlerinden elde edilen n , I_o ve Φ_b

Diyot sayısı	$I_o \cdot 10^{-7} (A)$	n	ϕ_b (eV)
1	1.230	2.370	0.684
2	1.150	2.110	0.686
3	1.030	2.450	0.689
4	3.190	3.130	0.666
5	1.800	2.890	0.674
6	1.310	3.200	0.683
7	1.230	2.690	0.684
8	1.480	2.530	0.679
9	3.770	3.140	0.655
10	0.990	2.890	0.691

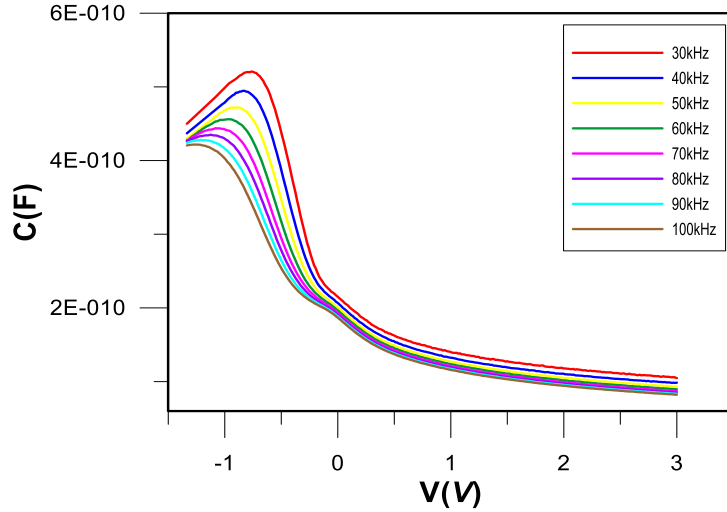
Çizelge 4.2. Tüm diyotlar için Cheung metodu kullanılarak elde edilen R_s , n ve Φ_b değerleri

Diyot sayısı	dv/dln(I)-I		H(I)-I	
	$R_s(k\Omega)$	N	Φ_b (eV)	$R_s(k\Omega)$
1	2.699	2.960	0.580	2.340
2	2.721	1.920	0.802	1.592
3	1.461	3.640	0.450	2.722
4	2.487	3.500	0.460	2.685
5	2.762	2.610	0.640	2.750
6	2.859	3.078	0.510	2.290
7	3.194	3.060	0.520	2.280
8	1.569	3.250	0.524	3.622
9	2.530	2.770	0.606	2.385

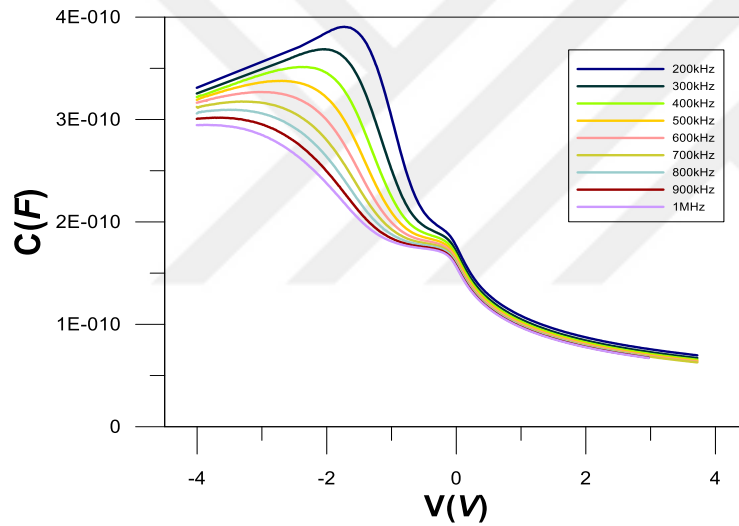
4.3. Kapasite-Gerilim ve İletkenlik-Gerilim Karakteristikleri

Hazırlanan Al/ZnO/p-Si shottky yapının bazı temel fiziksel özelliklerini geniş bir frekans aralığında araştırmak için; kapasitans-voltaj C-V ve iletkenlik-voltaj G-V ölçümleri kullanılarak incelendi. C-V ve G-V ölçümleri oda sıcaklığında Agilent 4294A Empedans Analizörü (40 Hz-110 MHz) ve bir IEE-488 çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kontrol edilerek, hem doğru hem de ters ön gerilim altında -4V' dan +4V' a kadar 0,1 V adım aralıklarla ve 30kHz - 1MHz frekans aralığında elde edildi. Böylece, C-V ve G-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. Deneysel C-V ve G-V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının bazı temel elektriksel ve dielektrik parametreleri hesaplandı. Elektriksel özelliklerden engel yüksekliği, fermi seviyesi, tüketim bölgesi genişliği, kesme potansiyeli, seri direnç ve arayüzey durumları gibi temel parametreler araştırıldı. Al/ZnO/p-Si Schottky diyotlar için C-V düşük ve yüksek frekanslar için Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.

Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi metal/yalıtkan/yarıiletken yapının yığılma, tüketim, tersinim karakteristiklerine sahiptir. Kapasitans değeri kuvvetli yığılımdan kuvvetli tersinim bölgesine doğru gittikçe azalmakta ve yığılım ile tüketim bölgesinde kapasitans değeri artan frekansla azalmaktadır [9,35]. Aynı şekilde, G-V eğrileri çizilirse bu eğrilerinde artan frekansla azaldığı görülebilir. Düşük frekanslardaki iletkenlik-voltaj eğrileri daha uzun zaman sabitine sahip olduklarından arayüzey durumlarını takip edebilmekte ve yüksek frekanslarda ise zaman sabiti küçük olduğundan takip edememektedir. Arayüzey durumlarının etkisinin hemen hemen hiç olmadığı, yüksek frekans C-V eğrilerinin, kuvvetli yığılım bölgesindeki maksimum değerlerine karşılık gelen kapasitans değeri C_i , yalıtkan tabakasının kapasitansıdır [39].



Şekil 4.5. Al/ZnO/p-Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı C-V eğrileri



Şekil 4.6. Al/ZnO/p-Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı C-V eğrileri

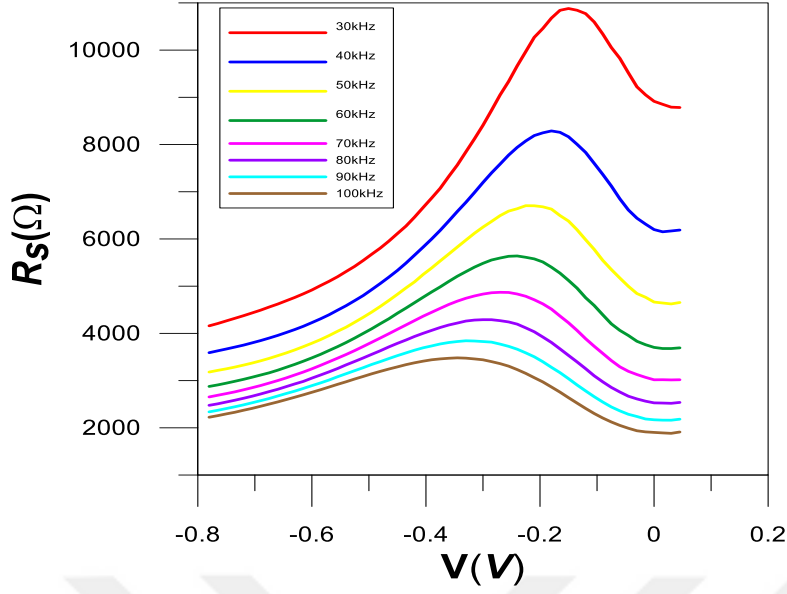
C-V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. C-V eğrilerinde meydana gelen bu pikler Si ile ZnO arasında ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının N_{ss} varlığına ve yapının seri direncine bağlı olarak ifade edilir. Yüksek frekans C-V eğrisinin sahip olduğu $1/\omega$ yaşam süresi, taşıyıcının yaşam süresi τ civarında yada daha küçükse arayüzey durumlarındaki taşıyıcı a.c. sinyali takip edemez. Bu nedenle yeteri kadar yüksek frekans ($\sim 1\text{MHz}$) bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı kapasitansa gelen bir katkı yoktur ya da ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece kapasitansa, yüksek frekanslarda olduğu gibi arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşır. Bu durum, arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda a.c. sinyali takip edememesi olarak belirtilir.

Seri direnç, beş farklı kaynaktan meydana gelebilir: i) Doğrultucu kontakta ölçüm için alınmış tel, ii) silisyum kristaline temas ettirilmiş arka (omik) kontak, iii) gövde ile arka kontak arasına yerleşmiş kirli bir film tabakası veya parçacık, iv) doğrultucu kontak altındaki silisyum yüzeyi kıyısında bulunan tüketme tabakası ve arka kontak arasındaki gövde direnci, v) doğrultucu kontak altında bulunan silisyum içerisindeki düzgün olmayan katkı dağılımı. Bu son derece düzensiz katkı profili oldukça yüksek öz dirençli bölge meydana getirir ki, bu da taşıyıcı yoğunluğu oluşturur. Seri direnç, ara yüzey özelliklerinin hesaplanmasında ciddi hatalara sebep olabilir. Bu hatalardan kaçınmak için, seri direnç etkisi azaltılmalıdır [40].

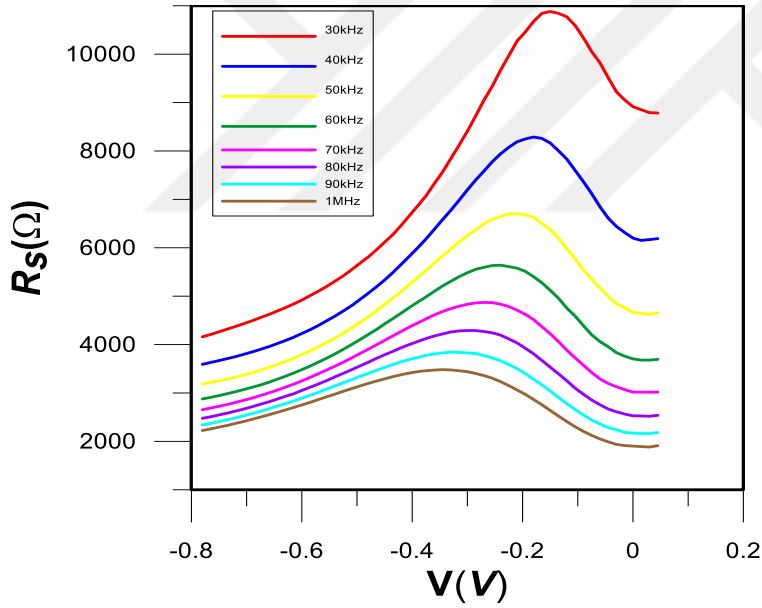
Al/ZnO/p-Si yapısının elektriksel karakteristiklerine etki eden seri direnç (R_s) etkisini ortadan kaldırmak için admittans tekniği kullanılarak [9,10,37],

$$R_s = \frac{G_{m,acc}}{G_{m,acc}^2 + \omega^2 C_{m,acc}^2} \quad (4.4)$$

ifadesi yardımıyla seri direnç değerleri hesaplanmıştır. Burada $C_{m,acc}$ ve $G_{m,acc}$ yığılma bölgesindeki ölçülmüş kapasite ve iletkenlik değerleridir. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de farklı frekanslar için voltaja bağlı R_s -V eğrileri elde edildi. Seri direnç frekansa bağlı olarak bir pik vermekte ve yeterince yüksek frekanslarda ise bu pik kaybolmaktadır. R_s -V grafiğinde pik değerleri artan frekans değerleriyle azalarak pozisyonları negatif voltaj bölgesine doğru kaymaktadır. R_s 'nin bu davranışı, frekans etkisinde Si/ZnO ara yüzeyinde ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının yeniden yapılanıp düzenlenmesine neden olabilir. Ayrıca, voltaja bağlı R_s 'nin profili N_{ss} 'nin yasak enerji aralığındaki özel bir dağılımına sebep olur [9].

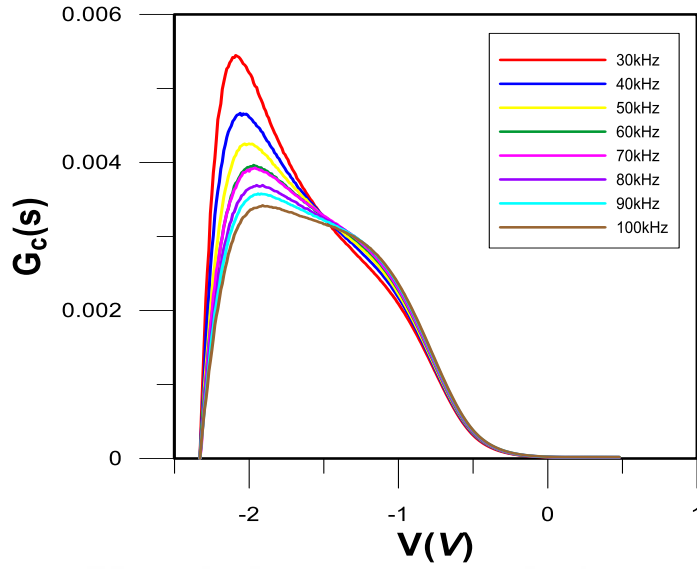


Şekil 4.7. Al/ZnO/p-Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı R_s -V eğrileri

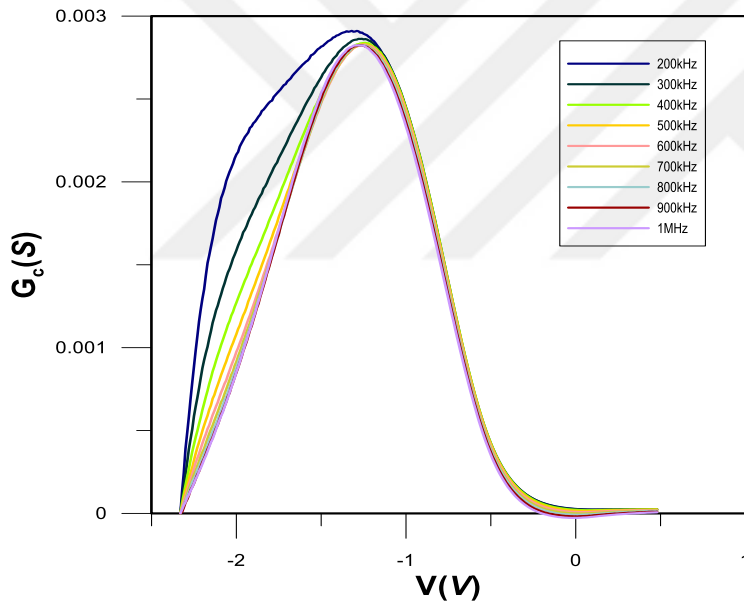


Şekil 4.8. Al/ZnO/p-Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı R_s -V eğrileri

R_s etkisinin çok önemli olduğu ve mutlaka bu R_s değerinin etkisi dikkate alınarak ölçülen C-V ve G-V eğrilerinin düzeltilmesini gerektirir. Bu yapılmadığı takdirde elde edilen parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği tartışılır. G_c değerlerinin farklı frekanslarda voltaja bağlı eğrileri şekil 4.9. ve şekil 4.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Al/ZnO/p-Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı G_c -V eğrileri



Şekil 4.10. Al/ZnO/p-Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı G_c -V eğrileri

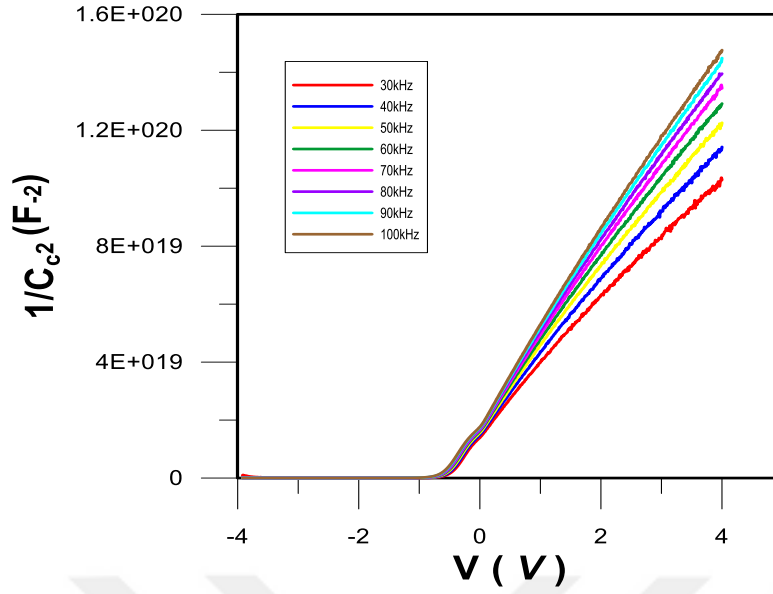
Düzeltilmiş iletkenlik-voltaj eğrilerindeki pik Si-ZnO ara yüzeyinde bulunan arayüzey durumlarına N_{ss} şeklinde ifade edilir. Bu arayüzey durumların mevcut olduğu bölgelerde, büyüklükleri ve yoğunlukları mertebesinde G_c -V eğrileri bir pikten geçer. Yüzey durumları yalıtkanla yarıiletkenin arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik ve değerlik bandı ile ani yük alışverişi yapar. Bundan dolayı bu yüzey durumları yüzey yeniden birleşme merkezleri olarak tanımlanır.

Ara yüzey tuzak bir verici olarak düşünülürse, o arayüzey durumu nötral durumdadır veya bir elektron vererek pozitif hale gelebilir. Ara yüzey tuzak bir alıcı ise nötral durumdadır veya bir elektron kabul ederek negatif olabilir.

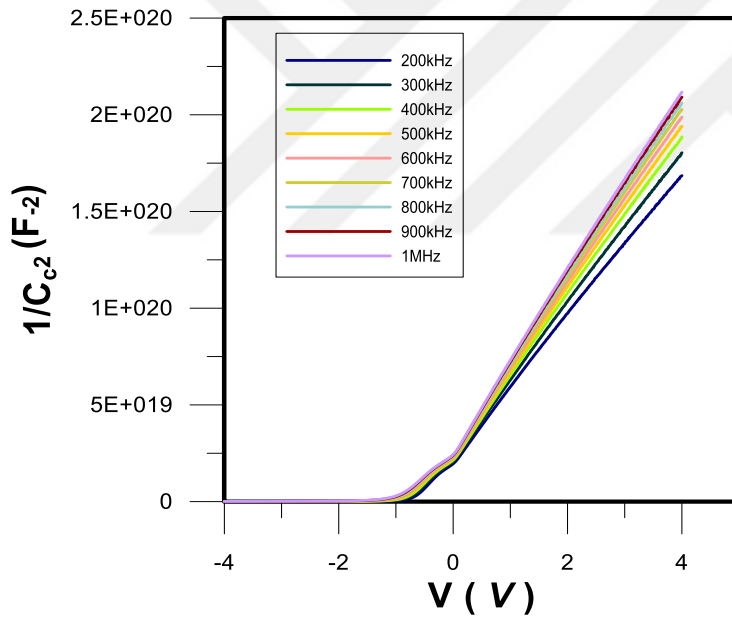
C-V ölçümlerinden tek frekans yaklaşımı kullanılarak arayüzey durumlarını tayin etmek mümkündür. Bu, hızlı ve güvenilir arayüzey durumları tayin etmede kullanılan Hill-Coleman metodudur [41]. Bu metotta,

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \left[\frac{\left(\frac{G_{c,max}}{w} \right)}{\left(\frac{G_{c,max}}{w.C_{ox}} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_c}{C_{ox}} \right)^2} \right] \quad (4.5)$$

ifadesi kullanılır. Burada q , elektrik yükü, w , açısal frekans, A , diyot alanı, C_{ox} biriktirme bölgesindeki oksit tabakası kapasitesi (geometrik kapasite), $G_{c,max}$ ve C_c , G-V ve C-V ölçümlerindeki maksimum iletkenlik ve kapasite değerleridir. Bu metot kullanılarak hesaplanmış arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}), Çizelge 4.3’de farklı frekanslarda bir diyot için değerler hesaplanmıştır. N_{ss} ve R_s değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Bu durum literatüre uygun beklenen bir davranıştır. Ayrıca arayüzey durum yoğunluklarının $eV^{-1}cm^{-2}$ başına 10^{13} - 10^{11} mertebesinde [37,42,43]. Bu nedenle hazırlanan yapıların bir yarı iletken devresi için oldukça uygun olduğu söylenebilir. Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.’de düşük ve yüksek frekanslarda elde edilen C_c^{-2} -V eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.11. Al/ZnO/p-Si yapının düşük frekanslarda gerilime bağlı C_c^{-2} -V eğrileri



Şekil 4.12. Al/ZnO/p-Si yapının yüksek frekanslarda gerilime bağlı C_c^{-2} -V eğrileri

Görüldüğü gibi, C_c^{-2} -V eğrileri düşük ve yüksek frekanslarda geniş bir voltaj aralığında lineer bir davranış göstermektedir. Bu lineer bölgede; ara yüzey tabakalı Schottky engel diyotları için C^{-2} ile V arasında,

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_A} (V_{bi} + V_R) \quad (4.6)$$

şeklinde verilir. Burada A doğrultucu kontak alanıdır, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. N_A verici katkı atomlarının yoğunluğu, V_R uygulanan ters ön-gerilimi ve V_{bi} ise C_c^{-2} - V eğrisinin voltaj eksenine extrapole edilmesiyle elde edilen kurulma (bult-in) voltajıdır. Yapıların tüketme tabakasının genişliği,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0 V_d}{qN_d}} \quad (4.7)$$

ifadesinden hesaplanır. Fermi seviyesi,

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) \quad (4.8)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada N_c iletim bandındaki etkin durumların yoğunluğu olup sıcaklığa bağlılığı,

$$N_v = 4.82 \cdot 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_e^*}{m_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.9)$$

şeklindedir.

Çizelge 4.3. Al/ZnO/ p -Si yapının farklı frekanslarda hesaplanan temel elektrik parametreleri ile R_s ve N_{ss} değerleri

Frekans (kHz)	V_{bi} (V)	$N_A(\text{cm}^{-3}) \times 10^{15}$	E_F (eV)	ϕ_b (eV)	$W_d(\text{cm}) \times 10^{-5}$	$R_s(\Omega)$	$N_{ss}(\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2})$
30	0.719	3.410	0.201	0.945	5.343	339.710	$6.09 \cdot 10^{13}$
40	0.704	3.030	0.204	0.933	5.611	321.920	$4.09 \cdot 10^{13}$
50	0.693	2.780	0.206	0.925	5.814	308.720	$2.84 \cdot 10^{13}$
60	0.685	2.600	0.207	0.918	5.970	300.130	$2.27 \cdot 10^{13}$
70	0.679	2.460	0.209	0.913	6.111	286.130	$1.91 \cdot 10^{13}$
80	0.675	2.370	0.201	0.910	6.215	281.390	$1.54 \cdot 10^{13}$
90	0.672	2.290	0.211	0.908	6.306	274.040	$1.43 \cdot 10^{13}$
100	0.669	2.220	0.211	0.906	6.386	269.140	$1.21 \cdot 10^{13}$
200	0.665	1.910	0.215	0.905	6.870	231.300	$3.55 \cdot 10^{12}$
300	0.667	1.780	0.217	0.910	7.135	205.270	$2.34 \cdot 10^{12}$
400	0.670	1.690	0.218	0.913	7.323	186.350	$1.73 \cdot 10^{12}$
500	0.673	1.640	0.219	0.918	7.468	171.670	$1.43 \cdot 10^{12}$
600	0.677	1.600	0.220	0.922	7.583	159.660	$1.19 \cdot 10^{12}$
700	0.681	1.560	0.220	0.926	7.686	149.500	$1.04 \cdot 10^{12}$
800	0.684	1.530	0.221	0.930	7.773	141.000	$9.15 \cdot 10^{11}$
900	0.713	1.510	0.221	0.934	7.848	133.760	$8.25 \cdot 10^{11}$
1000	0.692	1.500	0.221	0.939	7.916	127.270	$7.45 \cdot 10^{11}$

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında Al/ZnO/*p*-Si organik Schottky diyotlar üretildi. Üretilen Al/ZnO/*p*-Si MIS yapının akım-gerilim (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G-V) ölçümleri, 30kHz-1MHz frekans aralığında, oda sıcaklığında (300 K) ve karanlıkta alınmıştır. Örnek numuneler hazırlanırken pratikte hiçbir zaman seri direnci sıfır yapmak mümkün değildir. Ayrıca, gerek doğal olarak gerekse yapay olarak oluşturulan yalıtkan tabaka her zaman homojen yapılamayabilir ve dolayısıyla yalıtkan tabaka kalınlığı bölgeden bölgeye farklılık gösterebilir. Bu homojensizlikleri kaldırmak, ara yüzey durum yoğunluklarını ve seri direnci azaltmak için yarıiletken kristallerin son derece temiz bir ortamda hazırlanması, kontakların yüksek vakum ortamında oluşturulması ve numunenin alanının küçük tutulması önem arz etmektedir. Schottky diyotlar aynı şartlarda hazırlanmış olsa bile hesaplanan her bir parametrenin diyottan diyota farklı değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin Schottky kontaklarda oluşan engelin homojen olmayışı ile açıklanmıştır. Tez çalışmasında, deneysel C-V ve G-V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının elektriksel özellikleri incelenmiştir. Deneysel C-V ve G-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılma bölgesine kadar elde edilmiş ve C-V ve G-V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının bazı temel elektrik parametreleri hesaplanmıştır.

Schottky diyotların, ters ve düz beslem akım-gerilim (I-V) ölçümleri -4V ile +4V gerilim aralığında alınmıştır. I-V eğrilerinin ters beslem bölgesinde bir doyuma sahip olduğu ve düz beslem bölgesinde ise ideallikten sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Düz beslem bölgesinde açıkça üç bölge gözlemlenmiştir. Birinci bölge, yeniden birleşme adı verilen ve eksenden birkaç kT/q kadar uzaklığa kadar uzan kısımdır. İkinci bölge termoiyonik emisyon akımının geçerli olduğu lineer kısımdır. Üçüncü bölge ise seri direncin etkisini göstererek eğriyi aşağı doğru büküttüğü kısımdır. Her bir Schottky diyot için önemli diyot parametreleri olan doyma akımı (I_0), ideallik faktörü (n) ve engel yüksekliği (ϕ_F) değerleri termoiyonik emisyon teorisinden yararlanılarak $\ln I$ -V karakteristiklerinden hesaplanmıştır. I-V ölçümlerinden elde edilen, ideallik faktörü değerleri 2,11-3,19 ve engel yüksekliği değerleri 0,60-0,70 eV arasında bulunmuştur. İdeallik faktörü değerlerinin 1'den büyük çıkması arayüzey tabakasının, arayüzey durumlarının ve engel homojensizliğinin varlığından kaynaklanmaktadır. Metal ile yarıiletken arasında yeterince büyük bir oksit tabakası düşünüldüğünde, engel yüksekliği değerleri literatürde bu yapılar için hesaplanan değerler ile uyumludur.

Seri direnç, yarıiletken içerisindeki düzensiz katkıların yüksek öz dirençli bölgeler meydana getirmesinin yanı sıra, yarıiletkenle kontak arasındaki kirli film tabakalarının veya parçacıkların oluşturduğu istenmeyen bir durumdur. I-V eğrilerinin yüksek voltaj bölgesinde aşağı doğru bükülmesine ve dolayısı ile ideallikten sapmasına neden olan seri direnç (R_s) değerleri, Cheung yöntemi ile belirlenmiştir. Cheung yöntemi ile iki adet fonksiyon tanımlanmıştır. Bu yöntem ile, seri direnç (R_s) ve engel yüksekliğinin (ϕ_F) yanında ideallik faktörünün (n) de hesaplanması mümkündür. Cheung yöntemi ile 10 adet diyot için hesaplanan seri direnç değerleri $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ fonksiyonları için sırasıyla 1.46, 3-3.19 k Ω ve 1.5-3.62 k Ω arasındadır.

Schottky diyotların, ters ve düz beslem kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri -4V ile +4V gerilim aralığında ve 30kHz-1MHz frekans aralığında alınmıştır. Elektriksel karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesinde; kapasitans ve iletkenlik değerlerinin azalan frekansla arttığı, aynı zamanda C-V ve G-V eğrilerinin tüketim bölgesinde pik verdiği ve bu piklerin artan frekansla kaybolduğu gözlemlenmiştir. G-V eğrilerinde görülen bu pikler, artan frekansla küçük ön gerilim voltajından büyük ön gerilim voltajına doğru kaymaktadır. Düşük frekanslardaki kapasitans ve iletkenlik değerlerindeki bu artışın ve oluşan piklerin nedeni ZnO/p-Si ara yüzeyindeki ara yüzey durumlarının dolup boşalma zamanının frekansa bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda ara yüzey durumlarının a.c. sinyali takip edebilmesi sonucu frekansa bağlı olarak bir ilave kapasitans meydana gelmektedir. C-V ve G-V eğrilerinin frekansa karşı bu davranışı, numunenin diğer elektrik karakteristiklerinin frekansa bağımlılığının da bir göstergesidir. Diyotun performansını etkileyen önemli parametrelerden başında seri direnç ve ara yüzey durum yoğunlukları gelmektedir. Seri direnç ve ara yüzey durumları, hem frekansa hem de voltaja kuvvetlice bağlıdır. Bu davranışlar, yük tuzaklarının Si yasak enerji band aralığındaki yarıiletken/yalıtkan ara yüzeyinde yerleşmiş olan ara yüzey tuzaklarından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, yarıiletken ile dengede olan N_{ss} , a.c. sinyalini düşük frekanslarda daha kolaylıkla takip edebilir ve mevcut kapasitans değerine ilave bir katkı getirebilir. Bu sebeple yüksek frekanslarda R_s etkisi azalır. Ara yüzey durumlarının yoğunluğu, MIS yapıların elektriksel karakteristiklerini önemli ölçüde etkilenmektedir. R_s etkisinin çok önemli olmasından dolayı, R_s değerinin etkisi dikkate alınarak ölçülen, C-V ve G-V eğrilerinin düzeltilmesini gerektirmektedir. Bundan dolayı

kapasitans C-V ve G-V eğrileri seri direnç için düzeltilmiştir. Düzeltilmiş G-V eğrileri azalmakta ve bir pik vermektedir.

Sonuç olarak, seri direnç ve ara yüzey durumlarının elektriksel özellikler üzerine etkisinin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle temel yapı parametrelerinin hesabında R_s ve N_{ss} değerlerinin etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu yapılmadığı takdirde, ölçülen ve bu ölçümlerden hesaplanan hemen hemen tüm fiziksel parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği azalmaktadır. Ayrıca R_s ve N_{ss} değerleri özellikle tüketim ve tersinim bölgesinde etkindir.

Bu çalışmada hazırlanan Al/ZnO/p-Si yapılar için elde edilen tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip yapılar için arayüzey durumlarının, seri direnç ve yalıtkan tabakanın I-V, C-V ve G-V ölçümleri üzerine etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Bu nedenle yapının elektriksel karakteristiklerinin analizinde bu parametrelerin mutlaka dikkate alınması, sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından son derece önemlidir.



KAYNAKLAR

1. Braun, K. F. (1874). On the current conduction in metal sulphides. *Physical Chemistry*, 153(4), 556–563.
2. Schottky, W. (1937). Raumladungsschwächung beim schroteffekt und funkeleffekt. *Physica*, 4, 175.
3. Bardeen, J. (1947). Surface State and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact. *Physical Review*, 71(10), 717-727.
4. Rhoderick, E. H. (1970). The physics of the Schottky barriers. *Journal of Applied Physics*, 3, 1153-1167.
5. Rideout, V. L. (1978). A review of the theory, technology and applications of metal semiconductor rectifiers. *Thin Solid Films*, 48(3), 261-291.
6. Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36, 3212-3220.
7. Barret, C. Vapaille, A. (1979). Interface states in a cleaved M-S junction. *Journal of Applied Physics*, 50(6), 4217-4222.
8. Aboelfotoh, M. O., Tu, K. N. (1986). Schottky-barrier heights of Ti and TiSi₂ on n-type and p-type Si(100). *Physical Review B*, 34(4), 2311-2318.
9. Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices* (Second edition). New York: John Wiley & Sons, 362-390.
10. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts* (Second edition). Oxford: Clarendon Press.
11. Acar, S., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Selçuk, A. B., and Kasap, M. (2004). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Ag/p-Si (100) Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 233, 373-381.
12. Selçuk, A. B., Tuğluoğlu, N., Karadeniz, and Ocak, S. B. (2007). Analysis of frequency-dependent series resistance and interface states of In/SiO₂/p-Si (MIS) structures. *Physica B: Condensed Matter*, 400, 149-154.
13. Selçuk, A. B., Tuğluoğlu, N., Karadeniz, and Ocak, S. B. (2007). Effect of oxide thickness on the capacitance and conductance characteristics of MOS structures. *Physica B: Condensed Matter*, 400, 168-174.
14. Yüksel O. F., Ocak, S. B., and Selçuk, A. B. (2008). High frequency characteristics of tin oxide thin films on Si. *Vacuum*, 82, 1183-1186.
15. Yüksel O. F., Ocak, S. B., and Selçuk, A. B. (2008). Investigation of diode parameters using I-V and C- V characteristics of In/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 403, 2690-2697.

16. Selçuk, A. B., Ocak, S. B., and Karadeniz, S. (2012). Gaussian Distribution on Electrical characteristics of Al/SiO₂/p-Si Structures. *American Journal of Materials Science*, 2(4), 125-130.
17. Torrey, H. C., Whitmer C. A. (1948). *Crystal Rectifiers*. New York: McGraw Hill, 36-657.
18. Güllü, O., Kilicoglu, T., and Türüt, A. (2010). Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71, 351-356.
19. Güllü, O., Türüt, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structure. *Journal of Applied Physics*, 106, 103717.
20. Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T., and Uslu, I. (2009). Temperature dependent electrical and Dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky diodes. *Microelectron Reliability*, 50, 39-44.
21. Ocak, S. B., Selçuk, A. B., and Kahraman, G. (2014). Characterization of electrical properties of Al/Maleic Anhydride (MA)/P-Si structures by well-Known. *Synthetic Metals*, 191, 83–88.
22. Sönmezoğlu, S., Şenkuş, S., Taş, R., Çankaya, G., and Can, M. (2010). Electrical and interface state density properties of polyaniline-poly-3-methy triophene bblend/p-Si Schottky barrier diode. *Solid State Electronics*, 12, 706-711.
23. Wang, X. C., Bi, W. M., Dong, S., Chen, X. M., Ve Yang, B. H. (2009). Microstructure and optical properties of N-incorporated polycrystalline ZnO films. *Journal of Alloys and Compounds*. 478, 507-512.
24. Wang, H., Gao, X., Duan, Q., and Lu, J. (2005). Variation of surface properties of ZnO films by the implantation of N⁺ ions. *Thin Solid Films*, 492, 236–239.
25. Wang, C., Ji, Z., Liu, K., Xiang, Y., and Ye, Z. (2003). P-type ZnO thin films prepared by oxidation of Zn₃N₂ thin films deposited by DC magnetron sputtering. *Journal of Crystal Growth*, 259, 279–281.
26. Wang, C., Ji, Z., Xi, J., Du, J., and Ye, Z. (2006). Fabrication and characteristics of the low-resistive p-type ZnO thin films by DC reactive magnetron sputtering. *Materials Letters*, 60, 912–914.
27. Wang, X. H., Yao, B., Shen, D. Z., Zhang, Z. Z., Li, B. H., Wei, Z. P., Lu, Y. M., Zhao, D. X., Zhang, J. Y., Fan, X. W., Guan, L. X., and Cong, C. X. (2007). Optical properties of p-type ZnO doped by lithium and nitrogen. *Solid State Communications*, 141, 600–604.
28. Wang, D., Zhang, J., Peng, Y., Bi, Z., Bian, X., Zhang, X., and Hou, X. (2008). Plasma-activated nitrogen-doped p-type ZnO thin films with multibuffer-layers grown on sapphire (0001) by L-MBE. *Journal of Alloys and Compounds*, 478, 325-329.

29. Erie, J. M., Li, Y., Ivill, M., Kim, H. S., Pearton, S. J., Gilla, B., Norton, D. P., and Ren, F. (2008). Properties of Zn₃N₂-doped ZnO films deposited by pulsed laser deposition. *Applied Surface Science*, 254, 5941-5945.
30. Park, S. H., Chang, J. H., Minegishi, T., Park, J. S., Im, I. H., Ito, M., Taishi, T., Hong, S. K. H., Oh, D. C., Cho, M. W., and Yao, T. (2009). Investigation on the ZnO:N films grown on (0001) and (0001 $\bar{1}$) templates by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 311, 2167-2171.
31. Ziel, A. (1968). *Solid-state physical electronics*. New Jersey: Prentice-Hall, 7, 136-144.
32. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press, 1-3.
33. Neamen, D. A. (1997). *Semiconductor Physics and Devices* (Second edition). New York: Mc Graw-Hill, 420-450, 517-523.
34. Cheung, S. K., Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87.
35. Nicollian, E.H., Brews, J.R. (1982). *MOS Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, 40-175, 222-226, 423-439.
36. Özgür, Ü., Alivov, Ya. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Doğan, S., Avrutin, V., Cho, S. J., and Morkoç, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98, 041301.
37. Ocak, S. B., Selçuk, A. B., Aras, G., and Orhan E. (2015). Electrical Analysis of Al/ZnO/p-Si, Al/PMMA/p-Si and Al/PMMA/ZnO/p-Si Structures: Comparison Study. *Material Science and Semiconductor Processing*, 38, 249-256.
38. Ocak, S. B., Selçuk, A. B., and Kahraman, G. (2014). Electrical Characteristics of a Schottky device based on Maleic Anhydride deposited on p-type silicon by spin coating technique. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Synthetic Metals*, 191, 83-88.
39. Schroder, D. K., (1998). *Semiconductor Material and Device Characterization* (Second edition). New York: John, Wiley & Sons, 337-379.
40. Karadeniz, S. (2001). *Al/SiO₂/p-Si/Al Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektroniksel İletkenliğe Etkisi*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
41. Hill, W. A., Coleman, C.C. (1980). A single-frequency approximation for interface state density determination. *Solid-State Electronics*, 23(9), 987-993.
42. Çakar, M., Onganer, Y., and Türüt, A. (2002). The nonpolymeric organic compound pyronine-B/p-type silicon/Sn contact barrier devices. *Synthetic Metals*, 126, 213-218.

43. Çakar, M., Yıldırım, N., Doğan, H., and Türüt, A. (2007). The conductance and capacitance-frequency characteristics of Au/pyronine-B/p-type Si/Al contacts. *Applied Surface Science*, 253, 3464–3468.
44. Özkorucuklu, S., Süsoy, G., Aytan, Ö., Kurt, A., Arat, G., and Barut, O. A. (2014). Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi. *Özet Kitabı*, 406.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : OKUR, Rıdvan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.10.1982, Köyceğiz
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (533) 363 92 16
e-mail : ridvan.okur@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/İleri Teknolojiler ABD	Devam Ediyor
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi/Elk-Elkt.Müh.	2006
Lise	Köyceğiz Naip Hüseyin Lisesi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-Halen	KAMU	Memur

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Fotoğrafçılık, Trekking, Yüzme, Dalış, Maket Gemi



GAZİ GELECEKTİR..