

T.C
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**Al/P-Si SCHOTTKY DİYOTLARINDA MS VE MOS YAPILARDA DİYOD
PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: İkrām KELEŞ
DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI

VAN- 2008

T.C
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**Al/P -Si SCHOTTKY DİYOTLARINDA MS VE MOS YAPILARINDA DİYOD
PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: İkrām KELEŞ

VAN- 2008

ÖZET

Al/p-Si SCHOTTKY DİYOTLARINDA MS VE MOS YAPILARDA DİYOD PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

KELEŞ, İkrım

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bahri Batı

Ocak 2008, 41 Sayfa

Al/p-Si/Al Schottky kontaklarını ürettik. Üretilen yapının elektriksel karakteristiklerini incelemek için iki örnek göz önüne alındı. Numune fabrikasyonu için, 13 Ω cm öz dirençli ve 500 μ m kalınlıklı p-Si taban malzeme (substrate) olarak kullanıldı.

Numunelerin akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve kapasitans-frekans (C-f) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı. Ters doyma akım yoğunluğu (I_o), idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri her iki yapı için yarı logaritmik I-V grafikleri kullanılarak elde edildi. İlave olarak, hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini kontrol etmek ve seri direnç değerlerini belirlemek için Cheung fonksiyonları kullanıldı.

Numunelerin ters beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve (C-2-V) grafikleri -3 V-0 V aralığında ve 1MHz'de çizildi. Al/p-Si/Al kontakların C-V karakteristikleri bu grafikler kullanılarak incelendi. Ayrıca, numunelerin kapasitans-frekans karakteristikleri, C-f grafikleri kullanılarak araştırıldı. C-f grafiklerinden görüldüğü, ölçülen kapasitansın büyük değerleri düşük frekanslarda meydana gelmektedir ve frekansın belli bir değerine kadar neredeyse sabit kalmaktadır. Kapasitansın büyük değerlerinin küçük frekanslarda meydana gelmesi, düşük frekanslarda ac sinyaline ayak uydurabilen ve p-Si ile dengede olan arayüzey hallerinden kaynaklanan artık sığadan ileri gelmektedir.

Anahtar kelimeler: Arayüzey halleri, Engel yüksekliği, Schottky diyodu, Omik kontak.

ABSTRACT

IN Al/p-Si SCHOTTKY DIODES AND MS AND MOS STATES ON THE COMPARATION OF DIODES PARAMETERS

KELEŞ, İkrâm

Msc, Physics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Bahri BATI

January 2008, 41 pages

In this study, we have used Al/p-Si Schottky contacts fabricated previously. Samples have been named to be diode I and II diode.

In nowadays technology and in electronic industry Schottky contacts are widely used and they have large applied field. Due to that useful necessity of them, they must be vastly investigated.

In this study, on the n-type silicon crystal the contacts of aluminum have been made and the characteristics of $\ln(I)-V$, $C-V$, $C-f$ of Al/p-Si Schottky diode have been investigated.

From $\ln(I)-V$ plot of the Al/n-Si/Al diode, idealizing factor (n), barrier height ($e\Phi_{bn}$), donor density (N_D), saturation current (I_0) and serial resistor (R_s) have been calculated. In addition by using of Cheung functions the same parameters have been checked.

In a certain frequency interval of the diode C-V characteristics have been examined and in obtained graphic peak values have been observed. The C-f characteristics of the Al/n-Si/Al diode have been studied. Causes of addition capacity of the space charge have also been researched.

Key words : Barrier height, Interface states , Ohmic contact, Schottky diode.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve fedakârlıkta bulunan danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Bahri Batı'ya teşekkür ederim. Yapıcı eleştirilerinden ve bilgilerinden faydalandığım Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Sayın Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ'ye, Yrd. Doç. Dr. A. İhsan DEMİREL'e, Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ramiz RASİMGİL'e, Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR'A, Prof. Dr. Ramazan EMİNOV' ve Prof. Dr. Bahşeli GULİYEV'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımda 203-FED-041 ve 2003-FED-036 nolu projelerle kurulan Fizik Bölümü araştırma laboratuvarlarından dolayı Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına teşekkür ederim.

İkram KELEŞ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISILTLAMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM	4
3.1. Materyal	4
3.2. Yöntem	5
3.3. Metal n-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontak Oluşumu	5
3.4. Metal n-Tipi Yarıiletken Omik Kontak Oluşumu	6
3.5. Metal p-Tipi Yarıiletken Kontaklar	7
3.5.1. Metal p-Tipi Yarıiletken doğrultucu kontak	7
3.5.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontak	9
3.5.3. Schottky Diyodu	10
3.6. Metal –Yarıiletken Schottky Diyotlarında Akım İletimi	10
3.6.1. Difüzyon teorisi	10
3.6.2. Termiyonik emisyon teorisi	13
3.7. Schottky Diyotlarında I-V Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları	16
3.8. Metal – Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi	17

3.9. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri	20
4. DENEY SİSTEMİ ve ÖLÇÜMLERİ	22
4.1. Giriş	22
4.2. Numune Hazırlanması, Kimyasal ve Mekanik Temizlenmesi	22
4.3. Al/p-Si Schottky Diyotunun Yapılması	23
4.4. Schottky Diyotlarında Akım-Gerilim Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması	24
4.5. Al/p-Si Schottky Diyotlarında C-V Karakteristikleri	29
4.6. Al-p-Si Schottky Diyotlarında C- f Karakteristikleri	32
5. SONUÇ ve TARTIŞMA	36
KAYNAKLAR	38
ÖZ GEÇMİŞ	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. n- tipi yarıiletken-metal doğrultucu kontağın a.kontaktan önce, b. kontaktan sonra termal dengede, c. $V < 0$ olması durumunda enerji band durumu.	5
Şekil 3.2. n-tipi yarıiletken –metal omik kontağın a. kontaktan önce, b. kontaktan sonra termal dengede, c. $V = 0$ olması durumunda enerji band grafiği.	7
Şekil 3.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji band diyagramları	8
Şeki 3.4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakta enerji band diyagramları	10
Şekil 3.5. n+nM yarıiletken diyod yapısının termal dengede enerji-band Grafiği.	11
Şekil 3.6. n- tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band durumunu gösteren grafik.	12
Şekil 3.7. Schottky etkisinin varlığında metal-yarıiletken yapının enerji band grafiği.	16
Şekil 3.8. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın, a. potansiyel dağılımı, b. yük dağılımı	19
Şekil 4.1. Al-p/Si (Diyot-1) Schottky diyotlarında diyodun doğru belsem ve ters belsem için $\ln I - V$ değişimi.	25
Şekil 4.2. Al-p/Si (Diyot-2) Schottky diyotlarında diyodun doğru belsem ve ters belsem için $\ln I - V$ değişimi.	25
Şekil 4.3. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1 ve diyot-2 diyodun doğru belsem ve ters belsem için $\ln I - V$ değişimi.	26
Şekil 4.4. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1'in $\ln(I) - V$ grafiğinden elde edilen Cheung Fonksiyonları. $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafiği	28
Şekil 4.5. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-2'in $\ln(I) - V$ grafiğinden elde edilen	

Cheung Fonksiyonları $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafiği	28
Şekil 4.6. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1'in 100kHz ile 5MHz arasındaki C-V değişimi.	29
Şekil 4.7. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-2'nin 100kHz, 5MHz ve 10MHz değerleri için C-V değişim.	30
Şekil 4.8. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1'in 15MHz ve diyot-2'nin 25MHz değerleri için C-V değişim.	30
Şekil 4.9. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1 ve diyot-2'nin 1MHz frekansta -3V ile 0 Volt aralığında ters beslem C-V ölçümlerinde elde edilen C^{-2} -V grafiği	32
Şekil 4.10. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-2'nin 0.20V ile 0.40Volt aralığında C-f değişimi.	33
Şekil 4.11. Al-p/Si Schottky diyotlarında diyot-1'in 0.4V ile 0.1 Volt aralığında C- f değişimi.	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Doyma akım yoğunlukları ve engel yükseklikleri akım gerilim grafiğinden elde edilen değerleri	27

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

V_D	Difüzyon potansiyeli
N_D	Donar yoğunluğu
n	İdealite faktörü
C_o	Artık kapasite
k	Bolztman sabiti
T	Sıcaklık
R_S	Nötral bölge seri direnci
I_o	Doyma akım yoğunluğu
R	Richardson sabiti
P	Diyodun özdirenci
μ_n	Mobilite katsayısı
E_F	Fermi enerji seviyesi
E	Elektrik alan
$\mathcal{U}_n$	Taşıyıcı hareketliği
V_d	Sürüklenme hızı
N_e	N-tipi yarıiletkenin akseptör yoğunluğu
J	Termiyonik emisyon akım yoğunluğu
D_n	Elektronların yoğunluğu
e	Elektronun yük miktarı
m_n	Elektronun etkin kütlesi

Kısaltmalar

Al/p-Si/Al	Alüminyum(Omik Kontak) p-Tipi Silisyum (Doğrultucu Kontak) Alüminyum
a.c.	Alternatif akım
$e\Phi_b$	Engel yüksekliği
N_c	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
MIGS	Metalle sebep olunan haller (meal-induced gap states)

1. GİRİŞ

Günümüzde fizik biliminde gerek teorik, gerekse deneysel anlamda önemli araştırma alanlarından biride Schottky diyotlarıdır. Yapımlarının kolaylığı ve karakteristiklerinin çoklukla bilinmesi nedeniyle Schottky diyotlarının önemi, her geçen gün dahada artmaktadır. İdeal diyot (MS), metal-oksit-yarıiletken (MOS), son zamanlarda özellikle ilgi çeken polimerik ve nonpolimerik organik bileşiklerle yapılan kontaklar, bu alandaki çalışmalarda temel yapı olarak Schookky diyotların ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel iletkenlik özelliklerinden yeterince faydalanmak, uygun kontaklar uygulayarak uygun elektronik devrelerde kullanmak için karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekir. Önceleri metal-yarıiletken doğrultucular, dedektör olarak kullanmıştır (Rideout, 1978). Zamanla mikro dalga radarlarının gelişimiyle nokta kontak diyotları tekrar önem kazanmıştır. Nokta kontak diyotları, en çok frekans dönüştürücüsü olarak ve mikrodalga detektör diyodu olarak kullanıldılar.

Schottky, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal-yarıiletken alan etkili transistörü bulmuştur. Sonraları metal-yarıiletken yapıların karakteristikleri, Sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüş ve bu yapılar sıcaklığın tayininde kullanılmışlardır (Chandra ve Parsad , 1986).

MS doğrultucu kontakların teorik olarak açıklaması, bu yapıların pratikte uygulamalarından çok sonradır. Bu gelişmeyi metal-yarıiletken diyodlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirilmesi takip etmiştir. Ayrıca bu yapılarda yüzey hallerindeki elektronların net yükünden ve ters işaretli uzay yükünden dolayı bir dipol tabakası oluşabileceği gösterilmiştir. Schottky engel yüksekliğinin metal iş fonksiyonuna, arayüzey hallerine ve arayüzey tabaka kalınlığına bağlılığını incelemiştir. Schottky, diyotların engel yüksekliğinin arayüzey hallerinin enerji dağılımının ve uygulanan voltajla kontrol edildiği ileri sürüp analitik bir ifade elde ederek, bu ifadeyle ters ve doğru beslem kapasite ve kondüktans değerlerinin hesaplanabileceğini göstermiştir (Batı, 1993).

Sn/n-Si Schottky kontaklarda anodik oksidasyon yöntemiyle metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşturulacak kontrollü bir oksidasyon işlemiyle engel yüksekliğinin artırılabilceğini göstermişlerdir (Temirci ve ark.2001).

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Bardeen (1947), nokta kontak germanyum diyotlarında taşıyıcı enjeksiyonunu bulundu ve germanyum transistörü yapıldı.

Barrett ve Vapaielle (1978), daha önce elde edilen metotları kullanılarak arayüzey hallerinin enerji dağılımı deneysel olarak analizini açıkladı.

Batı (1999), yaklaşık son otuz yıldır metal-yarıiletken Schottky diyotlarında arayüzey hallerinin etkisi, çok yoğun bir şekilde, çeşitli metot ve tekniklerle araştırılmaktadır. Özellikle, son 25 yılda, arayüzey halleri hakkında bilgi, ilave veya artık kapasite (excess capacitance) analizlerinden çıkarılmıştır. İlk olarak; Schottky diyotlarında ara yüzey halleriyle ilgili bir teorik çalışma Haine tarafında yapılmıştır. Heiene (1965), Al/n-Si Schottky diyotlarında, C-f karakteristiklerinde düşük frekanslarında görülen uzay yükü sığasına ilave kapasitenin sadece arayüzey hallerinden ileri gelmediği, bunun yanında ilave kapasitenin omik kontak direncinin belirgin bir kapasitesinin olduğu ve artık sığanın sadece ara yüzey hallerinin bir ölçüsü olmayacağı sonucuna vardı.

Bethe (1981), Richardson'un metal-vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termiyonik emisyon teorisini metal- yarıiletken yapılara da uygulanabileceğini gösterdi.

Card ve Rhoderick (1973), arayüzey oksit tabakalı Si-Al kontaklarda arayüzey hal yoğunluğun belirlenmesi ve arayüzey hal yoğunluğunun doğru beslem akım-voltaj(I-V) karakteristiklerinin idealite faktörü üzerine etkilerini analiz etti.

Chattopadhyay ve Raychaudhuri (1993), seri direncin etkisini dikkate alarak Schottky diyotların doğru beslem C-V karakteristiklerinin frekansa bağıllığını inceledi. C-V karakteristiklerinde gözlenen kapasite pikini seri direnç etkisine atfedildi. Ayrıca, yüksek frekanslarda seri direncin daha etkin olduğunu teorik olarak bu çalışmalarında belirtildi.

Crowel ve Sze (1965), Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorilerini tek bir teori (emisyon-difüzyon teorisi) olarak gösterdi

Daw ve Chattopadhyay (1991), N- tipi ve p-tipi yarıiletkenlerle yapılan MIS tünel diyotlarının, engel yüksekliğinin tuzak yoğunluğuna bağlı değişimini inceledi. Engel yüksekliğinin safsızlığa kuvvetlice bağlı olduğu gözlemlendi.

Deneuille ve ark (1974), Card ve Rhoderic in çalışmaları genişletilerek hem arayüzey tabakasının kalınlığı hem de arayüzey hallerinin enerji dağılımını doğru ve ters beslem I-V karakteristiklerinden elde etti.

Evans ve ark. (1985), doğru beslem Schottky diyotlarında uzay yükü bölgesi kapasitesindeki fazlalık düşük frekans kapasitesi olarak gözlemlendi ve bu artık kapasiteyi azınlık taşıyıcılara değişik olarak yüzey hallerine atfedildi.

Gamila ve Rubi (1997), bir yarıiletken eklem boyunca taşıyıcıların hareketini analiz ederek, arayüzey hallerinin yoğunluğunun belirlenmesi için bir bağıntı elde etti. Bu bağıntıya bağlı olarak idealite faktörü için doğru beslem durumunda tüm beslem üzerinden geçerli olan analitik bir ifade bulundu.

Oswald ve ark. (2005), GaN Schottky diyotların I-V karakteristiklerinin sıcaklığa bağlılıkları inceledi. Ga-N kutuplanmasındaki Ga-N yüzeyler arasındaki büyük engel yüksekliği farkları görüldü ve bu Ga ve N eşzamanlı karışık kutuplanmasında ileri gelen yüzey farklarına atfedildi. I-V, C-V eğrilerinden hesaplanan engel yükseklikleri arasındaki farkın bağlı yüzey polarizasyon yüklerinden ileri geldiği belirlendi.

Schottky ve Spenke (1939), metal-vakum sistemlerde imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasını buldu.

Schottky ve Spenke (1939), p^+ eklem diyotların gerilim-sıcaklık (I-V) karakteristikleri inceledi. Ayrıca enerji engelinden taşıyıcı difüzyonu olayını esas alan doğrultma teorisini geliştirdi.

Sze (1981), p-n eklemleri yapımı için birçok metot geliştirdi ve metal-yarıiletken kontakları, bu eklem yapılarında akım iletimi için omik kontak olarak düşünülmesini sağladı.

Sze ve ark. (1964), metal-yarıiletken doğrultucu kontakların teorik olarak izahını yaptı ve metal-yarıiletken kontaklarda imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasını gösterdi.

Torrey ve Whitmer (1874), nokta kontak diyotları, frekans dönüştürücüsü ve mikrodalga detektör diyodu olarak kullandı.

Willson (1983), metal-yarıiletken diyodlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirdi ve doğrultma teorisi için ters polariteyi açıkladı.

Wu ve Yang (1989), n- tipi yarıiletkenden yapılan Schottky diyotların, yüzey yükü ve arayüzeyde düşen voltaj göz önünde bulundurularak, arayüzey teroisini geliştirdi. Pozitif uzay yükü artışının potansiyel engelini düşürdüğünü ve arayüzey tabakasında düşen voltajın doğru beslem I-V karakteristiklerinin, idealite faktörünü arttırdığını buldu.

Ziel (1968), metal-yarıiletken yapıların karakteristiklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçtü ve bu yapıları sıcaklığın tayininde kullandı.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmalarda Schottky diyotlarında Ms ve Mos yapılarında diyod parametrelerinin hazırlanması ve yapımı anlatılmıştır. I-V, C-V, C-f karakteristikleri incelenmiştir.

3.2.Yöntem

Bu çalışma Schottky diyotların I-V, C-V, C-f karakteristikleri ile ilgili literatürden faydalanılarak deneysel olarak Al/p-Si/Al Schottky diyotun karakteristikleri incelenmiştir.

3.3. n-Tipi Yarıiletken-Metal Doğrultucu Kontak Oluşumu

Akım taşıyıcılarını (hol ve elektron) bir doğrultuda diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontaklar denir. n-tipi yarı iletkenin ve metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak $\Phi_m > \Phi_s$ ise metal-n tipi yarı iletken doğrultucu kontağı oluşur. Burada Φ_m metalin iş fonksiyonu , Φ_s ise yarı iletkenin iş fonksiyonudur.

Kontaktan önce metal n- tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band diyagramı şekil 3.1' de görülmektedir. Yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontaktan sonra bir yük hareketlenmesi oluşur. Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar, bu yüzey tabakasinda geride iyonize olmuş donarlar bırakarak metalin içine geçerler. Yük mübadelesi bittikten sonra, metalin ve n-tipi yarı iletkenin Fermi seviyeleri aynı düzeye gelir (Zile, 1968). Bu yarıiletken gövdedeki enerji seviyelerinin $\Phi_m - \Phi_s$ miktarı kadar aşağı kaydığını ifade eder. Sonuçta; metal tarafındaki yüzey yükleriyle n-tipi yarıiletken tarafındaki uzay yüklerinin oluşturduğu dipol tabakası, kontakta bir potansiyel engelin kurulmasına, yani yarıiletken tarafında bandların yukarı doğru bükülmesine neden olur. Kontaktan sonraki metal n-tipi yarı iletkenin enerji band diyagramı şekil 3.1.b'de görülmektedir.

Bu potansiyel engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği;

$$eV_d = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.1)$$

kadardır. Burada metal yüzeyine göre ölçülen V_d potansiyeline difüzyon potansiyeli denir.

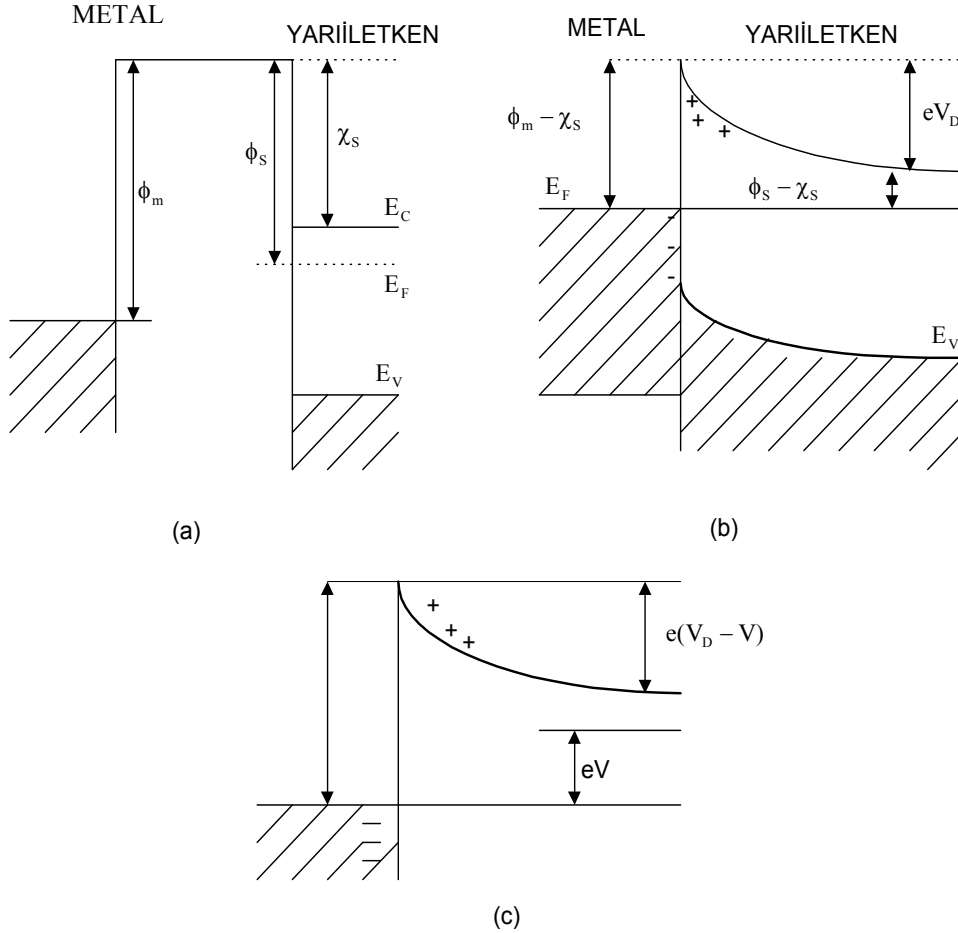
Potansiyel engelin metal tarafındaki yüksekliği;

$$e\Phi_{bn} = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.2)$$

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

Metal tarafından dik olarak yükselen potansiyel engeli, yarıiletken içerisinde d genişliğine sahiptir. Böylece yarıiletken tarafında elektronlardan arınmış yüklerden yoksun olan bir bölge oluşur. Bu d genişliğindeki bölgeye engel bölgesi (tabakası), uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi veya arınma bölgesi denir. Pozitif ve negatif yükler arasında kalan bu bölge kapasite özelliğine sahiptir ve Schottky kapasitesi (veya kontak kapasitesi) olarak adlandırılır. Engel tabakasının d kalınlığı, iyonize olmuş donarların konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyeli V_d 'nin değerine bağlıdır.

Termal uyarılmalardan dolayı, yeterli enerjiye sahip olan metalin bazı elektronları, potansiyel engelini aşıp yarıiletkenin içerisine geçerler. Aynı şekilde, yarıiletkenin bazı elektronları potansiyel engelini aşıp metalin içerisine geçerler. Denge durumunda bu, eşit ve zıt I_0 akımlarına sebep olacaktır.



Şekil 3.1. n- tipi yarıiletken-metal doğrultucu kontağın a.kontaktan önce, b. kontaktan sonra termal dengede, c. $V < 0$ olması durumunda enerji band durumu

Yarıiletkene bir $(-V)$ voltajı uygulanırsa (Şekil 3.1) soldan sağa giden (metalden yarıiletkene) elektronlar için engel değişmez ve bundan dolayı sağdan sola karşılık gelen akım

da değişmeyecektir. Fakat iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri eV kadar yükseldiğinden, sağdan sola giden elektronlar için engel eV miktarı kadar azalmış olacaktır. Sonuç olarak net akım;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.3)$$

denkleminde eşit olur.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli yüksekliği uygulanan V voltajına bağlı olarak değişir. Ancak metal tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği, voltaj uygulamalarından bağımsızdır (Schottky etkisi ve ara yüzey tabakası etkisi hariç).

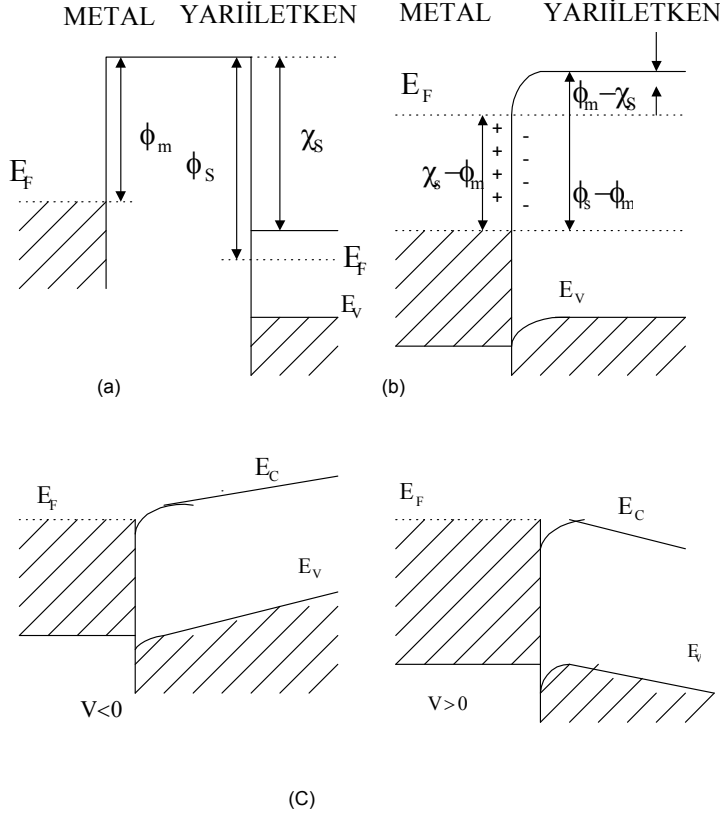
Metal –n tipi yarıiletken doğrultucu kontak için, $V>0$ ise kontak ters beslemede, $V<0$ ise kontak doğru beslemededir.

3.4. n-Tipi Yarıiletken –Metal Omik Kontak Oluşumu.

p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s , metalin iş fonksiyonu Φ_m den büyük ise ($\Phi_m < \Phi_s$) omik kontak oluşur. Kontakta önceki enerji band diyagramı Şekil 3.2 a’da gösterilmiştir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, elektronlar metalden yarıiletkenin içine, geride bir pozitif yüzey yükü bırakarak akarlar ve kontakta yarıiletken tarafında bir negatif yüzey yüküne sebep olurlar. Yük mübadelesi bittikten sonra, yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar yükselir. Termal dengeden sonra, kontakta her iki tarafında meydana gelen yüzey yükünden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Böyle bir kontakta, taşıyıcılar metalden yarıiletkene, yarıiletken metale serbestçe geçerler. Bir V voltajı uygulandığında bu potansiyel farkı doğrultucu kontakta olduğu gibi sadece kontak bölgesinde değil bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Kontakta sonraki enerji –band diyagramı Şekil 3.2 b’de görülmektedir.

Yarıiletkene pozitif ve metale negatif bir voltaj uygulandığında, metaldeki elektronlar yarıiletken tarafına kolay bir şekilde geçerler ve bundan dolayı omik kontaklara enjeksiyon kontakları da denir (Şekil 3.2.c)

Pratikte omik kontak elde edebilmek, için n-tipi yarıiletkenin yüzeyi buharlaştırılan metal yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Böylece yarıiletkenin yüzeyinde bir n+ tabakası oluşur. Bu tabaka yarı iletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir.



Şekil 3.2. n-tipi yarıiletken –metal omik kontağın a..kontakdan önce, b. kontakdan sonra termal dengede, c. $V=0$ olması durumunda enerji band grafiği

3.5 Metal p-Tipi Yarıiletken Kontaklar

Bu çeşit kontaklar da kontağın çeşidini anlamak için, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bakmak gerekir. Metalin iş fonksiyonu ϕ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s , difüzyon potansiyelini V_d ve vakum seviyesi ile yarıiletkenin dolu bandını tepesi arasındaki enerji farkını E_s olarak kabul edelim.

3.5.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ($\phi_m < \phi_s$), doğrultucu kontak oluşur. Kontakdan önce (Şekil 3.2.a) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_s - \phi_m$ kadar düşüktür. Kontakdan sonra (Şekil 3.2.b), metalden yarıiletkene Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar elektron akışı meydana gelir. Buna bağlı olarak yarıiletkenin yüzey tabakası negatif olarak yüklemiş olur. Bu negatif yük iyonize olmuş akseptörlerle oluşur ve bu yük d kalınlıklı bir uzay yükü tabakası boyunca dağılır.

Şekil 3.3. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta enerji bant diyagramları.

- a) Kontakta önceki durum, b) Kontakta sonra ve termal dengedeki durum,
c) $V < 0$ durumunda, d) $V > 0$ durumunda

Enerji seviyesi yarıiletken tarafında $\phi_s - \phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletkendeki holler için yüzey engeli

$$eV_d = \phi_s - \phi_m \quad (3.4)$$

olur. Kontakta metal tarafında holler için potansiyel engeli ise

$$E_s - \phi_m \quad (3.5)$$

olarak verilir.

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkenin bazı holleri potansiyel engelini aşıp metalin içine geçecek kadar enerji kazanırlar ve metalin içinde termal olarak oluşan bazı hollerde yarıiletkenin içine potansiyel engelini aşıp geçecek kadar enerji kazanırlar. Böylece engeli geçen eşit ve zıt I_o akımları oluşur.

Yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (şekil 3.3.c), soldan sağa (metalden yarıiletkene) doğru olan hol akımı (I_o) değişmez. Fakat sağdan sola (yarıiletkenden metale) doğru olan hol akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Zira yarıiletkende holler için engel yüksekliği eV kadar azalmış ama metaldeki boşluklar için ise değişmemiştir. Sağdan sola olan doğrultu pozitif akım doğrultusu olarak alınır, karakteristik akım-gerilim ifadesi

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

Şeklinde olur. Bu durumda, akım bir doğrultuda diğerine göre daha büyüktür. O halde kontak, doğrultucu kontaklıdır.

3.5.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontak

Metal p-tipi yarıiletken kontakta $\phi_m > \phi_s$ olursa omik kontak oluşur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ yukarıdadır. Kontakta sonra metal ve yarıiletkenin elektrokimyasal enerjileri (Fermi seviyeleri) aynı düzeye gelinceye kadar yarıiletkenden metale elektron geçişi gerçekleşir. (Ziel,1968). Sonuçta bir denge durumuna ulaşılır. Yarıiletkenin Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar alçalır. Kontakta önceki ve sonraki enerji-bant diyagramları verilmiştir. (Şekil 3.4.a ve 3.4.b)

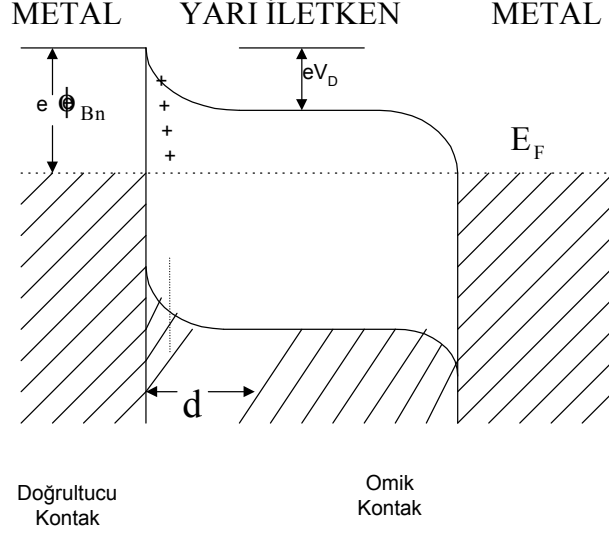
Şekil 3.4. Metal p-tipi yarıiletken omik kontakta enerji bant diyagramları.

- a) Kontakta önceki durum, b) Kontakta sonraki durum, c) $V > 0$ durumunda
d) $V < 0$ durumunda

Elektronlar yarıiletken tarafında bir deşik bırakarak metale geçerler. Bu geçişler metal üzerinde negatif, yarıiletken üzerinde pozitif yüzey yükünün oluşmasına yol açar. Böylece yarıiletkende Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar düşer. Metal (+) ve yarıiletken tarafı (-) olacak şekilde bir voltaj uygulanırsa, ters beslem durumunda metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler yarıiletkenlik içine kolay bir şekilde hareket edebilirler. Bu şekilde akımı iki doğrultuda da geçirebilen kontaklar, omik kontaklardır.

3.5 Schottky Diyodu

Metal –n tipi yarıiletken –metal (n+nM) yapısı; n-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine elektron bakımından çok zengin n+n omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kontağından oluşmaktadır. Termal dengede böyle bir yapının enerji-band grafiği şekil 3.3’de görülmektedir. n+ omik kontak tarafı $V < 0$ olacak şekilde beslendiğinde yapı doğru beslemede olur. n+ tarafı $V > 0$ olacak şekilde beslendiğinde yapı ters beslemede olur. n+nM yapısı diyod özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı kısaca yarıiletken diyod olarak adlandırılır.



Şekil 3.5 n+nM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-band grafiği

3.6. Metal –Yarıiletken Schottky Diyotlarında Akım İletimi

Metal –Yarıiletken Schottky diyotlarında akım iletimi, Schottky ve Spenke tarafından ileri sürülen difüzyon teorisi ve termiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Aşağıda bu teoriler kısaca açıklanacaktır.

3.6.1. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, şu kabuller göz önüne alınarak açıklanır;

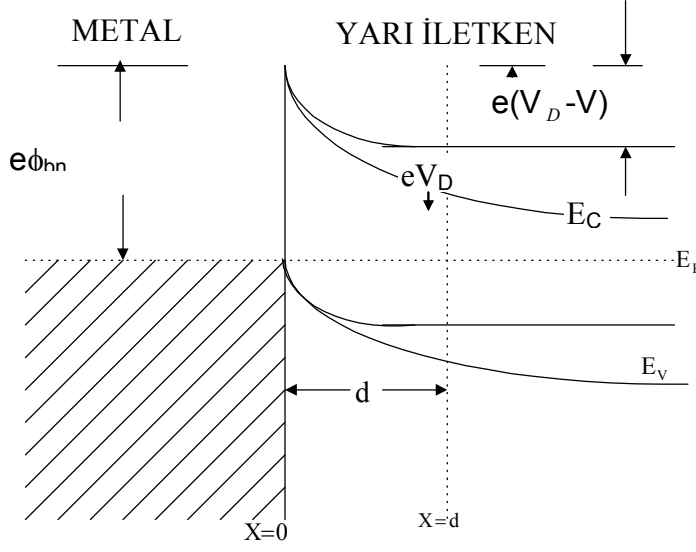
- 1) Engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür.
- 2) Geçiş bölgesinde elektronlar arasında gerçekleşen çarpışmalar ihmal edilemez.
- 3) $x=0$ ve $x=d$ 'deki taşıyıcı yoğunlukları akım akışından etkilenmez.
- 4) Yarıiletkenin katkı atomu yoğunluğu değiştirmez.

Metal –n tipi yarıiletken kontağın şekil 3.6'deki enerji band diyagramına göre yarıiletkene–V gerilimi uygulandığında, potansiyel ve taşıyıcı yoğunluğu için sınır şartları;

$$x = 0'da \quad \psi = 0 \quad \text{ve} \quad x = d'de \quad \psi = V_d - V \quad (3.7)$$

$$x = 0'da \quad n = n_0 = N_D \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \quad \text{ve} \quad x = d'de \quad n = N_d \quad (3.8)$$

Burada N_d donar konsantrasyonu V_d difüzyon potansiyelidir.



Şekil 3.6. n- tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji band grafiği

Geçiş bölgesinde akım yoğunluğu, elektrik alana ve taşıyıcı gradyentine bağlı olduğundan dolayı;

$$J_n = e \left\{ n(x) \mu_n E + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right\} \quad (3.9)$$

denklemini yazılır. Burada D_n difüzyon sabiti, E elektrik alan μ_n taşıyıcı hareketliliği ve $n(x)$ herhangi bir x noktasındaki taşıyıcı yoğunluğudur. Denklem (3.9)'nın her iki tarafını $\exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right)$ terimi ile çarpıp, alan ve hareketlilik yerinede $E = -\frac{d\psi}{dx}$ ve

$\mu_n = \frac{e}{kT} D_n$ ifadelerini koyarsak;

$$J_n = \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) dx = e D_n d \left\{ n(x) \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) \right\} \quad (3.10)$$

denklemini elde ederiz.

Denklem (3.10)'ün integralini $x = 0$ 'dan $x = d$ 'ye kadar alıp (3.7) sınır şartlarını göz önüne alırsak;

$$J_n \int_0^d \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) dx = e D_n \left\{ -n_0 + N_d \exp\left[-\frac{e(V_d - V)}{kT}\right] \right\} \quad (3.11)$$

$$= eD_n N_d \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

denklemini elde edilir. $0 \leq x \leq d$ aralığındaki potansiyel ifadesi

$\psi(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right)$ yukarıdaki denklemde yerine konularak gerekli işlemler yapılırsa

$$J_n \int_0^d \exp\left(-\frac{e\psi}{kT}\right) dx = \epsilon_s \epsilon_0 kT \bigg/ N_d e^2 d \quad (3.13)$$

denklemini elde edilir. Bu ifadeyi (3.10) 'de yerine yazarsak;

$$J_n = e\mu_n N_d \left\{ \frac{2eN_d(V_d - V)}{\epsilon_s \epsilon_0} \right\}^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (3.14)$$

ifadesini elde ederiz. Bu ifadede ilk büyük parantez içindeki terim kontaktaki elektrik alan şiddetidir. Sürüklenme hızı;

$$V_d = \mu_n \cdot E_0 \quad (3.15)$$

olduğu için (3.14) denklemini şöyle yazılabilir;

$$J_n = eN_d |V_d| \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (3.16)$$

Bu ifade bize, taşıyıcı difüzyonu nedeniyle meydana gelen akım yoğunluğunu verir. Benzer hesaplamalar metal-p tipi yarıiletken Schottky kontağı için yapılırsa;

$$J_n = eN_a |V_d| \exp\left(-\frac{eV_d}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (3.17)$$

elde edilir. Burada N_a , p tipi yarıiletkenin akseptör yoğunluğudur.

3.6.2. Termiyonik emisyon teorisi

Termiyonik emisyon, sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların salınması anlamına gelir. Metal –yarıiletken doğrultucu kontaklarda bu olay, metal ya da yarıiletken tarafındaki taşıyıcıların potansiyel engelini termal enerjileri nedeniyle aşması olarak tanımlanır. Metal n-tipi yarıiletken yapılarda bu olay elektronlar, metal p-tipi yarıiletken yapılarda ise holler

tarafından sağlanır. Bu nedenle bu tür yapılarda akım iletimi çoğunlukla taşıyıcılar tarafından sağlanır. İlk olarak yarıiletkeniden metale doğru olan termiyonik emisyon akım yoğunluğu J_{Y-M} 'yi çıkaralım. x-yönünü kontak yüzeyine dik olarak alalım. Hızları V_x ile $V_x + dV_x$ arasında olan elektronların yoğunluğu;

$$d_n = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{\frac{1}{2} m_n^* V_x^2}{kT} \right) dV_x \quad (3.18)$$

ifadesi ile verilir. Burada N_d donar yoğunluğunu m_n^* yarıiletkenideki elektronların etkin kütlesi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Yarıiletkenin potansiyel uygulanmadığı zamanki akım yoğunluğu, hızları $(\frac{1}{2})m_n^* V_x^2 \geq eV_d$ şartını sağlayan elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımı aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$\begin{aligned} J_{Y-M} &= \int_{V_{ox}}^{\infty} eV_x d_n = eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{V_{ox}}^{\infty} V_x \exp \left(- \frac{\frac{1}{2} m_n^* V_x^2}{kT} \right) dV_x \\ &= eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{eV_d}{kT} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

burada $V_{ox} = \left(\frac{2eV_d}{m_n^*} \right)$ olup, taşıyıcının eV_d engelini aşması için gerekli olan eşik

hızıdır. İletkenlik bandının tabanı, sıfır enerji seviyesi olarak alınırsa, donar yoğunluğu:

$$N_d = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp(-E_F / kT) \quad (3.20)$$

eşitliği ile verilir. Bu ifade (3.16)'de yerine konulursa

$$J_{Y-M} = \frac{4\pi e m_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp \left(- \frac{eV_d + E_F}{kT} \right) \quad (3.21)$$

elde edilir. Şekil 3.7'den de görüldüğü gibi, metal tarafında yarıiletkenin iletkenlik bandının kenarına göre engel yüksekliği $e\Phi b_n = eV_d + E_F$ olur. Böylece;

$$J_{Y-M} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.22)$$

ifadesini yazabiliriz. Burada

$$R_n^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2 T^2}{h^3} \quad (3.23)$$

Değerine sahiptir ve elektronlar için etkin Richardson sabiti diye adlandırılır. Metal n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru beslemede olduğu zaman engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu $\exp(eV/kT)$ çarpanı ile artacaktır. Dolayısıyla

$$J_{Y-M} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT}\right) \{\exp(eV/kT) - 1\} \quad (3.24)$$

olur. Burada;

$$J_0 = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.25)$$

J_0 doyma akım yoğunluğudur.

Denklem (3.25) ile verilen doyma akım yoğunluğu uygulanan gerilimden bağımsız olması gerekirken Schottky etkisinden dolayı uygulanan gerilime bağlı olarak bir miktar artış gösterir. Schottky etkisi (Şekil 3.7); elektrostatik etkileşme ve uygulanan gerilimden (elektrik alan) dolayı engel yüksekliğinin $(e\Delta\Phi_{bn})$ kadar alçalmasıdır. Bu engel alçalması $(e\Delta\Phi_{bn})$: İmaj kuvvet etkisinden dolayı engel alçalması)

$$e(\Delta\Phi_{bn}) = \alpha_0 (V_d + V)^{\frac{1}{4}} \quad (3.26)$$

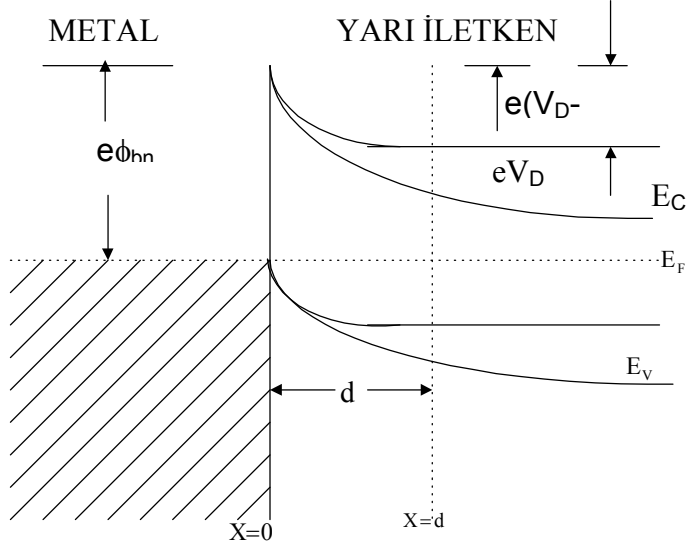
bağıntısı ile verilir. Böylece akım yoğunluğu ifadesi $e\Phi_{bn}$ yerine $e(\Phi_{bn,0} - \Delta\Phi_{bn})$ yazılırsa;

$$J_0 = R_n^* T^2 \exp(-e\Phi_{bn}/kT) \exp\left(\alpha_0 (V_d + V)^{\frac{1}{4}}\right) \quad (3.27)$$

olur. Denkleminden de görüldüğü gibi bu ifade, uygulanan gerilime bağlıdır. Burada $\Phi_{bn,0}$ sıfır beslem voltajında imaj-kuvvet (Schottky) etkisiz engel yüksekliğidir ve α_0 sabiti;

$$\alpha_0 = \left\{ \frac{e^7 \cdot N_d}{8(\epsilon_s \epsilon_0)^3 \pi^2 (kT)^4} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (3.28)$$

şeklindedir. Burada ε_s yarıiletkenin ve ε_0 ise boşluğun dielektrik sabitleridir.



Şekil 3.7. Schottky etkisinin varlığında metal-yarıiletken yapının enerji band grafiği

3.7. Schottky Diyod Doğru Beslem I-V Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları

Termiyonik emisyon modelinin geçerli olduğu ideal Schottky diyotlarında doğru beslem akım yoğunluğu-gerilim karakteristiğinin;

$$J = J_0 \{ \exp(eV_D / kT) - 1 \} \quad (3.29)$$

şeklinde olduğu daha önceki kesimlerde verilmişti. Burada J doyma akım yoğunluğudur ve V engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. Pratik olarak gerçekleştirilen Schottky diyotlarda, doğru beslem akım –gerilim karakteristiklerinde ideal sapmalar olabilir. Bu sapmalar idealite faktörü (n) boyutsuz bir sabit cinsinden tanımlanır. Bu durumda denklem (3.29);

$$J = J_0 \{ \exp(eV_D / nkT) - 1 \} \quad (3.30)$$

şeklini alır. Burada $\exp(eV_D / kT) \gg 1$ durumu göz önüne alınır ve (3.30) eşitliğinde J_0 yerine yazılırsa, bu eşitlik;

$$J = R_n^* T^2 \exp(-e\Phi_{bn} / kT) \exp[e(V - IR) / nkT] \quad (3.31)$$

olarak elde edilir. Burada $(V_D - IR)$ 'dir, V ise uygulanan gerilimdir. (3.31) denkleminde

$$(I = AJ)$$

$$V = RAJ + n\Phi_{bn} + (n / \beta) \ln(J / R_n^* T^2) \quad (3.32)$$

şeklinde düzenlenir. Burada A diyotun etkin alanı ve $\beta = e/kT$ dir. Bu son denklemi J'ye göre diferansiyeli

$$dV/d(\ln J) = RAJ + n/\beta \quad (3.33)$$

olur $dV/d(\ln J)$ 'nin J'ye göre grafiği bir doğrudur. Doğrunun eğiminden R seri direnci, doğrunun $dV/d(\ln J)$ eksenini kestiği noktadan ise idealite faktörü (n) bulunabilir. $e\Phi_{bn}$ 'yi elde etmek için;

$$H(J) = V - (n/\beta) \ln(J/R_n^* T^2) \quad (3.34)$$

fonksiyonundan yararlanılır.(3.34) denklemi (3.32) ile birlikte düşünülürse;

$$H(J) = V - (n/\beta) \ln(J/R_n^* T^2) \quad (3.35)$$

olur. $H(J)$ 'nin J'ye göre çizilen grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden R seri direnci, doğrunun $H(J)$ eksenini kestiği noktadan da $e\Phi_{bn}$ engel yüksekliği bulunabilir. (3.30) ve (3.31) denklemleri Cheung fonksiyonları olarak adlandırılır (Cheung ve Cheung, 1986).

3.8 Metal – Yarıiletken Schottky Diyodların Engel Kapasitesi

Engel tabakası veya Schottky tabakasının arınma (deplation) bölgesi paralel levha kondansatör gibi davranır. İdeal bir metal –n tipi yarıiletken Schottky diyot göz önüne alalım. Ters beslem durumunda, ters beslem gerilimi artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalden uzaklaşırlar ve buna bağlı olarak gerilim artmasından dolayı arınma bölgesinin genişliği artar. Aynı zamanda yarıiletkende metale yakın önemli bir hol konsantrasyonu varsa hollerin yeni fermi seviyesi metaldeki fermi seviyesiyle çakışacağından hol konsantrasyonu azalacaktır. Deplasyon bölgesindeki bu yük değişimi kapasite değişimine sebep olacaktır. Dolayısıyla bu tür diyotlar varaktör (değişken kapasitör) olarak da kullanılırlar. Ayrıca, ters beslem altındaki kontak(engel) sığasından diyod parametreleri ile ilgili bilgilerde elde edilebilir. Metal –yarıiletken kontakın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson denklemi ile verilir.

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.36)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabiti ve $\rho(x)$ uzay-yük yoğunluğudur.

n-tipi yarıiletkenin elektron verici atom yoğunluğu (donar) N_d ve yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu n olmak üzere ; $\rho(x)$ uzay-yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_d - n) \quad (3.37)$$

ifadesi ile verilir. Metal -n tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile $\rho(x)$ uzay -yükü yoğunluğunun x 'e göre değişimi şekil 3.6 'da görülmektedir. $e(V_d - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında $N_d \gg n$ 'dir. Bundan dolayı;

$$\rho(x) = eN_d \quad (3.38)$$

bağıntısı yazılır. $\rho(x)$ 'in bu değeri ,(3.36) denkleminde yerine konulursa, tek boyutta Poisson denklemi

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_0} \quad (3.39)$$

şeklinde verilir.

Denklem (3.39)aşağıdaki sınır şartları altında çözülürse $\Psi(x)$ bulabiliriz. Sınır şartları:

$$\begin{aligned} 1) \quad x = 0' da \Psi(x) &= 0 & 2) \quad x \geq d' de \Psi(x) &= V_d \pm V \\ 3) \quad x \geq d' de \quad \frac{d\Psi(x)}{dx} &= 0 \end{aligned}$$

şeklindedirler. (2.39) denkleminin üçüncü sınır şartları altında, ilk integraliyle kontak bölgesindeki elektrik alan elde edilir.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = \frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_0}(x - d) \quad (3.40)$$

Bu ifadenin integralini birinci sınır şartı altında alırsak $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonunu buluruz.

$$\Psi(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s\epsilon_0} \left(\frac{1}{2}x^2 - xd \right) \quad (3.41)$$

Denklem (3.41) ikinci sınır şartı altında çözülürse, Schottky tabakasının d genişliği bulunur.

$$(V_d \pm V) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon_s\varepsilon_0}d^2, d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{eN_d}(V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (3.42)$$

$V=+V$ için kontak ters beslemededir. Schottky tabakasının kapasite gibi davranacağına daha önce işaret edilmişti. Yarıiletkenin yüzey başına yük miktarı,

$$o = eN_d \cdot d = [2\varepsilon_0\varepsilon_s eN_d(V_d \pm V)]^{1/2} \quad (3.43)$$

ifadesiyle verilir. Birim alan başına küçük-sinyal kapasitesi, uygulanan voltaja göre yük değişimi olarak tanımlanır.

$$C = \frac{do}{dV} = \left[\frac{e\varepsilon_s\varepsilon_0 N_d}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \quad (3.44)$$

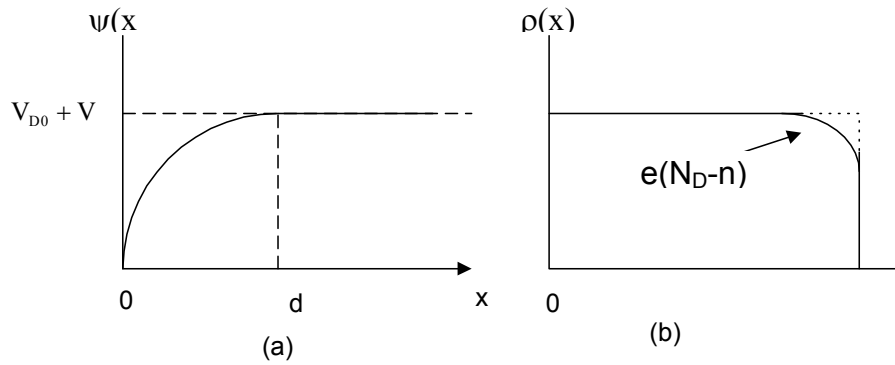
Bu ifadede den görüldüğü gibi uygulama voltajı arttığında kapasite azalır, d ise artar. Eğer C, N_d nin bir fonksiyonu olarak düşünülecek olursa, N_d nin artması ile C artar, buna bağlı olarak da azalır. (3.44) denkleminde N_d yi ve V_d 'yi veren ifadeleri elde edebiliriz. Son denklem;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{e\varepsilon_s\varepsilon_0 N_d} \quad (3.45)$$

şeklinde yazılabilir. $C^2 - V$ grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğiminden

$$N_d = \frac{2}{e\varepsilon_0\varepsilon_s} \cdot \frac{dV}{d(1/C^2)} \quad (3.46)$$

elde edilir. Doğrunun V eksenini kestiği nokta V_d difüzyon potansiyelini verir.



Şekil 3.8. Metal n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın, a. potansiyel dağılımı, b. yük dağılımı

3.9. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Arayüzey Tabakasının Etkileri

Schottky –Mott teorisine göre Schottky diyotlarda engel yüksekliği metalle yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir, yani engel yüksekliği metalin iş fonksiyonuna çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Fakat yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olduğunu gösterdi. N-tipi bir yarıiletken ile doğrultucu kontak haline getirilen bir metalin p-tipi için omik kontak oluşturması gerekirken doğrultucu kontakta oluşturabileceği bulundu. Yarıiletken üzerindeki yüzey halleri cinsinden bu açıkladı. Bu yüzey halleri yarıiletkenin içinin metalden perdeler ve difüzyon potansiyelinin ve dolayısıyla engel yüksekliğinin gerçek değerinden farklı olmasına sebep olurlar. Yine Bardeen modeli, metal ile yarıiletken arasında bir yalıtkan tabakanın varlığını da kabul eder (Card ve Rhoderick, 1973).

Arayüzey halleri, tahmin edilen ve gözlenen Schottky engel yüksekliklerinin arasındaki farktan dolayı hesaba katılır. Bu arayüzey (yüzey) hallerinin dört parçaya ayırabiliriz.

a) Metal ile kontakta önce yarıiletken ve vakum seviyeleri arayüzeyinde mevcut olan asal yüzey halleri, bunlar genel olarak yarıiletken kristalin periyodik yapısının yüzeyde kesilmesinden ortaya çıkarlar (Crowel ve Sze, 1965).

b) Metal ile kontakta sonra ortaya çıkan asal olmayan (extrinsic) yüzey halleri; bunlar yarıiletkenin yüzeyinde yığılmış olan yabancı atomların varlığından veya metalin yeteri kadar temiz olmayışından dolayı oluşan yüzey halleridir.

c) Hem yarıiletkenin yüzeyinde hem de yarıiletkenin gövdesinde bulunan kusurlar (defects) ve kirlere ortamdan çıkan asal olmayan yüzey halleri, bu haller metal buharlaştırıldığında yarıiletkenin ince bir tabakasıyla (arayüzey tabakası) metalden ayrılırlar. Bu durumda, bu hallerin dengede olduğu söylenir.

d) Arayüzey kimyasal reaksiyonlarından ortaya çıkan arayüzey halleri veya metalle uyarılan yüzey halleri. Metallerden bazıları temiz yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırıldıklarında metal ile yarıiletken arasında kuvvetli bir kimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu reaksiyondan dolayı arayüzeyde arayüzey tabakası olarak kabul edilen yeni bir bileşik ve dolayısıyla yeni arayüzey halleri ortaya çıkmış olur. Metalle uyarılan veya metalle sebep olunan haller (meal-induced gap states-MIGS), metalden yarıiletkeneye yük transferiyle ortaya çıkan hallerdir. Bir metal bir yarıiletkenin yüzeyine temas ettirildiğinde (kontak haline getirildiğinde) MIGS'ler yarıiletkenin yüzeyindeki asal yüzey hallerinin yerine geçebilirler.

Deneyssel olarak bu dört tipin varlığı gösterilmiştir. Torik hesaplamalarda bu arayüzeylerin yapısı ve özellikleri güvenilir bir şekilde tartışılmıştır. Bu dört tip arayüzey hallerinin Schottky diyot karakteristiklerinin beklenilenden farklı çıkmasına sebep oldukları hem deneyssel hem de teorik olarak gösterilmiştir.

Bunlara ilave olarak, metalle yarıiletken arasındaki ince oksit tabakası band yapısı karakterine sahip değildir ve metal-yarıiletken sinden dolayı termal dengedeki sıfır beslem engel yüksekliği ideal bir Schottky diyotunkinden daha kontaklardaki etkisi aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1) Bu tabakadaki potansiyel değişmesi olacak.
- 2) Elektronlar, bu tabakadan dolayı oluşan engelin içinden geçerler (tünelleme) ve bu durum Schottky parametrelerinin beklenilenden farklı çıkmasına neden olur.
- 3) Bir gerilim uygulandığında, bu gerilimin bir kısmı arayüzey tabakası boyunca düşeceğinden (Şekil 3.7) engel yüksekliği uygulanan geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu beslem bağımlılığı, I-V karakteristiklerinin biçiminin değişmesine sebep olur. Bu durum ideallikten sapma olarak tanımlanır ve idealite faktörü olan n cinsinden ifade edilir.

Ayrıca, arayüzey tabakası ve arayüzey hallerinin Schottky diyot kapasitesine etki ve katkılarına aşağıdaki gibi işaret edilebilir.

$20^\circ A'dan$ daha küçük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri metalle $20^\circ A'dan$ daha büyük kalınlıklı arayüzey tabakası için arayüzey halleri yarıiletkenle dengededir.

Arayüzey halleri, yüksek frekanslarda ($f > \text{MHz}$) a.c. sinyaline cevap veremediğinden engel kapasitesine katkıda bulunamazlar. Bundan dolayı, arayüzey hal yoğunluğu besleme değişmez ve sabit kalır.

4. DENEY SİSTEMİ ve ÖLÇÜMLERİ

4.1. Giriş

Bu bölüm, Al/p-Si/Al Schottky diyotunun yapımı için gerekli malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve yapımını içerir. Numunelerin ölçülmesinde kullanılan aletler ve teknikler bu bölümde yer almaktadır. Yapılan ölçümlerden diyot parametrelerinin bulunması, karakteristiklerinin tartışılması ve sonuçlarının tartışılması yine bu bölümde yer almaktadır.

Bu çalışmada kullanılan numuneler Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Proses Laboratuvarında bulunan ve Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Başkanlığının 2003-FED-041 ve 2003-FED-036 nolu projeleriyle alınan “AUTO 306 VACUUM COATER WITH TURBO MOLECULAR PUMPING SYSTEM” adlı cihaz kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler ise Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Başkanlığının 2003-FED-041 ve 2003-FED-036 nolu projeleriyle desteklediği Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında bulunan ‘KEITHLEY 6487 PICOAMMETER AND VOLTAGE SOURCE’ adlı cihaz kullanılarak alınmıştır.

4.2. Numune Hazırlanması, Kimyasal ve Mekanik Temizlenmesi

Bu çalışmada, 500 μm kalınlıklı ve $\rho=13 \Omega\text{-cm}$ öz dirençli ve Antimon katkılanmış p-tipi Si kristal kullanılmıştır.

Diyot yapımında iyi netice alınması için numunenin organik ve metalik kirlere mutlak temizlenmesi gerekir. Bu sebeple sırayla;

1- Numune üzerinde kalan organik kirler ile daha önceden var olan organik ve metalik kirleri gidermek için numune kimyasal temizlemeye tabi tutulur.

2- Buharlaştırmada kullanılan metaller (Al), kullanılmadan önce metanol da beş dakika ultrasonik olarak yıkanır.

3- Kullanılan ısıtıcılar kullanılmadan önce seyreltilmiş hidroklorik asitte beş dakika ultrasonik olarak yıkanır. Buharlaştırma cihazının temizliği buharlaştırma işleminden önce yapılır. Bunun için fanus ve sehpa seyreltilmiş HCl (1/10) ile yıkanır.

4- Kristaller, kristal yüzeyindeki kusurların ve organik kirlerin etkisini en aza indirebilmek için bu numuneler sırasıyla, izopropil alkolde, sulandırılmış HF’ de, seyreltilmiş hidroklorik asite (HCl:1/10) ,tekrar sulandırılmış HF’ de ve saf suda temizlenir.

5- Daha sonra kristaller kimyasal olarak CP-4(HNO) içinde 2–3 dakika kadar bekletilerek parlatılır. Kontakların çok iyi olması için mekanik ve kimyasal temizleme mümkün olduğu kadar dikkatli yapılır.

4.3 Al/p-Si Schottky Diyotunun Yapılması.

1- Numuneye ve kaplama ünitesine gerekli kimyasal temizleme yapıldıktan sonra, p-Si kristali vakum cihazına (kaplama ünitesi) yerleştirilir.

2- Kontak geometrisinin belirlene bilmesi için 1–2 mm çapında dairesel maskeler kullanılır. Numune 6 cm yüksekliğindeki sehpa üzerine konmuş maske üzerine kristalin mat tarafı gelecek şekilde konur.

3- Omik kontak için,

a- İzopropil alkolle iyice temizlenen saf Al dan bir parça vakum cihazına yerleştirilerek 10^{-7} tor (mg H_g) basınçta buharlaştırılır.

b- Daha sonra numune 430 °C ye ayarlanmış fırına konarak 5 dakika tavllanır. İletkenliği artırmak için numunenin arkasına komple Al buharlaştırılmalıdır. Bu omik kontak kalitesini artırır.

Böylece omik kontak elde edilmiş olur. Böylece diyot doğrultucu kontak yapımı için hazır hale gelmiş oldu.

4 -Doğrultucu kontak için saf Al kullanıldı.

a- Al buharlaştırılmadan önce seyreltilmiş hidroklorik (HCl,H₂O;1,10) asit ile ultrasonik olarak temizlendi. Kristalin parlak yüzeyine 1mm çapında maske kullanıldı.

b- Daha sonra p-Si kristalinin parlak tarafına 1 mm çapında dairesel maskeler ve 6 cm lik sehpa kullanılarak vakum cihazında 10^{-7} tor basınçta Al buharlaştırıldı.

5- Bu ikinci buharlaştırma esnasında numunenin ısınmamasına dikkat edilmelidir. Numunenin bu işlemde aşırı ısınması doğrultucu kontağı bozabilir. Doğrultucu kontak elde edilmiş olur. Böylece Al/p-Si Schottky Diyotunun yapılması tamamlanmış olur.

Biz bu çalışmada iki adet Al/p-Si/Al Schottky diyodu imal ettik. p- tipi Si kristalinden iki parça aynı şartlarda kimyasal temizlemeye tabi tutuldu. Daha sonra aynı şartlarda buharlaşma cihazına konularak mat taraflarına saf Al buharlaştırıldı ve 430 °C derecede fırında 5 dakika tavlандılar. Böylece numunelerin omik tarafları oldu. Diyotlardan biri (Diyot1) hemen, diğeri (Diyot 2) bir gün sonra doğrultucu kontak için buharlaştırma cihazına konularak saf Al buharlaştırıldı. Böylece iki tane Al/p-Si/Al Schottky diyodu elde edilmiş olur.

4.4 Schottky Diyotlarında Akım-Gerilim Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması

Bu çalışmada kullanılan diyotların I-V ölçümlerinde 'KEITHLEY 6487 PICOAMMETER VOLTAGE SOURCE'adlı cihaz kullanılarak alındı.

Alınan ölçülerle doğru beslem ve ters beslem $\ln I$ -V grafikleri çizildi. Bu çalışmada kullanılan diyotların $\ln I$ -V grafikleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 de ayrı ayrı ve Şekil 4.3 te ikisi bir arada görülmektedir. Diyotların $\ln I$ -V grafiğinin doğru kesiminin eğimi (4.4) denkleminde yerine yazılarak n idealite faktörü ve düşey eksenini kestiği noktadan doyma akım yoğunlukları I_0 alınarak ters ve doğru beslem için (4.6) denkleminde göre engel yükseklikleri bulunur. Burada R Richardson sabiti olup p-tipi Si için $112 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ve diyodun etkin alanı $A=7.85.10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak alındı. Öz direnci $\rho=13 \Omega\text{-cm}$ olan p-tipi silisyum kristali için hareketlilik (mobitile) $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ dir. $T=293 \text{ }^0\text{K}$ oda sıcaklığında iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu $N_c = 2.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ tür. Bu değerleri N_D donör yoğunluğu ve Fermi enerji E_f seviyesini bulmak için kullanıldı. Bu değerler,

$$N_D = N_C \exp(-E_F / kT) \quad (4.1)$$

$$N_D = 1 / e \rho \mu_n \quad (4.2)$$

Denklemlerinde yerine yazılarak $N_D = 1.54 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak ve $E_F = 0.21 \text{ eV}$ olarak bulundu. Donör yoğunluğu ve Fermi enerji seviyesi kullanılan yarıiletken özelliklerini yansıtan parametrelerdir.

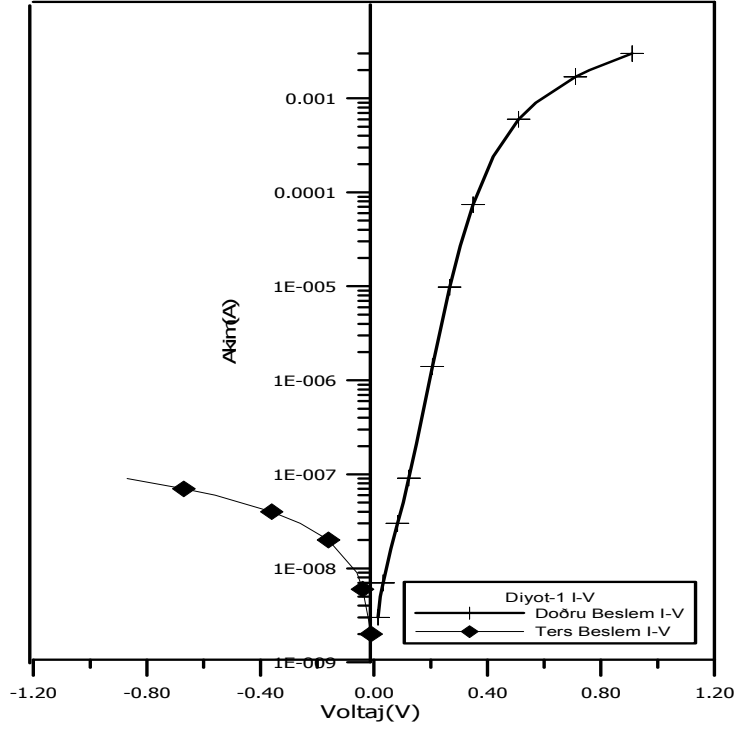
İdealite faktörünün hesaplanması için temel akım denklem kullanılabilir. Bunun için (3.29) denklemi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

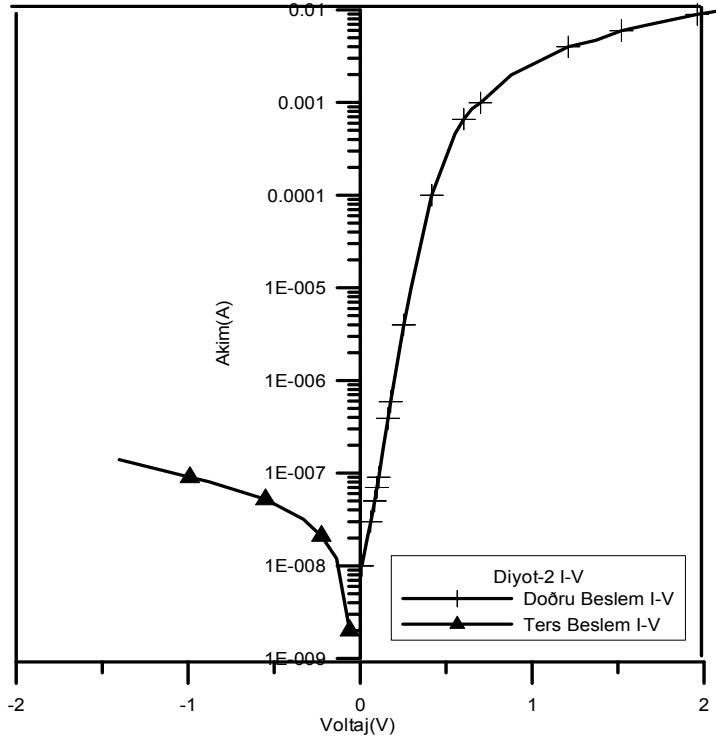
şeklinde yazılabilir. Burada n idealite faktörüdür. Ayrıca burada $eV \gg 3kT$ olması durumunda 1 ihmal edilebilir. Buradan logaritmaya geçilir, V 'ye göre türev alınır ve n idealite faktörü çekilirse;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

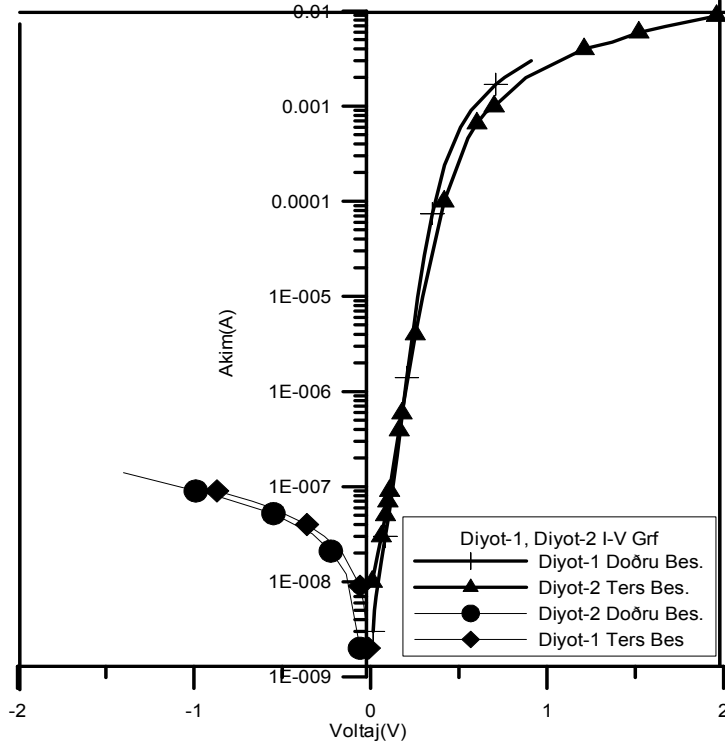
elde edilir. Bu son ifadedeki $dV/d(\ln I)$ ifadesi $\ln I$ -V grafiğinden okunabilir.



Şekil 4.1. Al/p-Si (Diyot-1) Schottky diyodu doğru beslem ve ters beslem için $\ln I$ -V değişimi



Şekil 4.2. Al/p-Si (Diyot-2) Schottky diyotunun doğru beslem ve ters beslem için $\ln I$ -V değişimi



Şekil 4.3. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyet-1 ve Diyet-2 diyotların doğru beslem ve ters beslem için $\ln I$ -V değişimi

Bu son denklemde (4.4) $\ln I$ -V grafiğinin doğru kesiminin eğiminden $dV/d(\ln I)$ değeri yerine yazılarak idealite faktörü bulundu. Bu çalışmada kullanılan diyotların idealite faktörleri (Diyot1) için $n_1=1.32$ ve (Diyot 2) içinde $n_2=1,63$ bulunmuş.

İdealite faktörlerinin büyük çıkması ara yüzey tabakası, ara yüzey hallerine atfedilebilir. (Tataroğlu ve Altındal, 2006)

Doyma akım yoğunluğu denklem (3.29) den dolayı

$$I_0 = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden engel yüksekliği için

$$e\phi_{Bn} = kT \ln\left(AR_n^* T^2 / I_0\right) \quad (4.6)$$

elde edilir. Doyma akım yoğunlukları ve engel yükseklikleri akım gerilim grafiğinden okunup yerine yazılarak Çizelge 4.1 'deki gibi bulundu. Numunelerin etkin alanları $7.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ve numune sıcaklığı oda sıcaklığı ($T=293^\circ \text{ K}$) dır.

Çizelge 4.1. I-V ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri

Diyotlar	(lnI-V) grafiği	n(Cheung fonk)	I_0 (doğru beslem) (A)	I_0 (ters beslem) (A)	$e\phi_{Bn}$ (eV) (Doğru b.)	$e\phi_{Bn}$ (eV) (Ters b.)
Diyot-1	1,32	1,37	2.10^{-9}	2.10^{-8}	0,80	0,76
Diyot-2	1,63	1,62	1.10^{-8}	3.10^{-8}	0,77	0,75

Ayrıca Kesin 3.7 da verilen temel akım denkleminde türetilen (3.33), (3.35) denklemleri ile verilen Cheung fonksiyonları grafiklerinin çizim için, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de ’de verilen doğru beslem, $\ln I$ -V grafiğinin, büyük voltajlara karşılık gelen lineer olmayan kısmından elde edilen

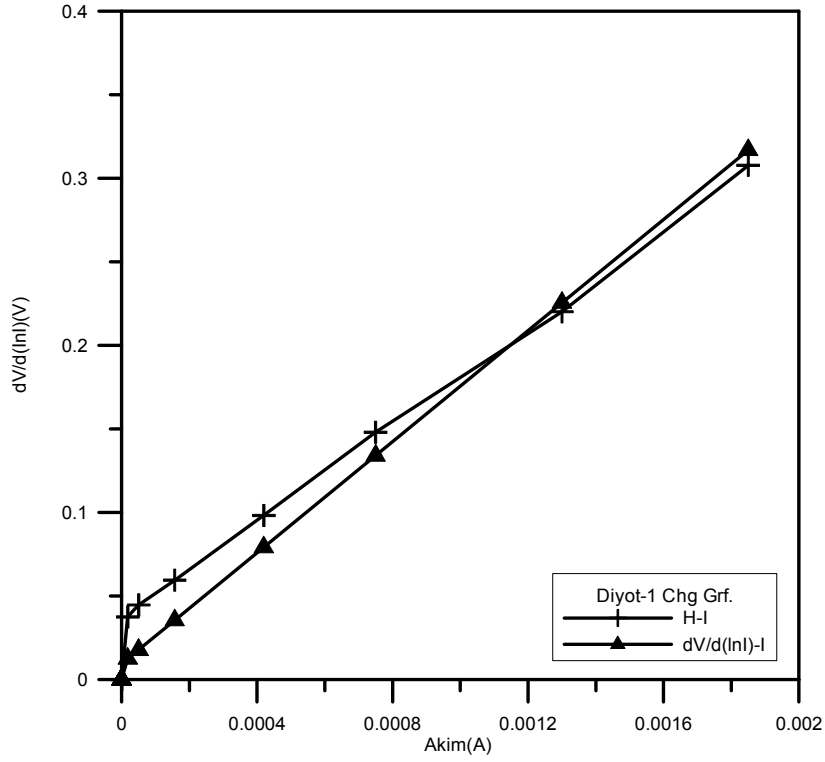
$$dV/d(\ln I) = (nkT/e) + R_s I \quad (4.8)$$

ve

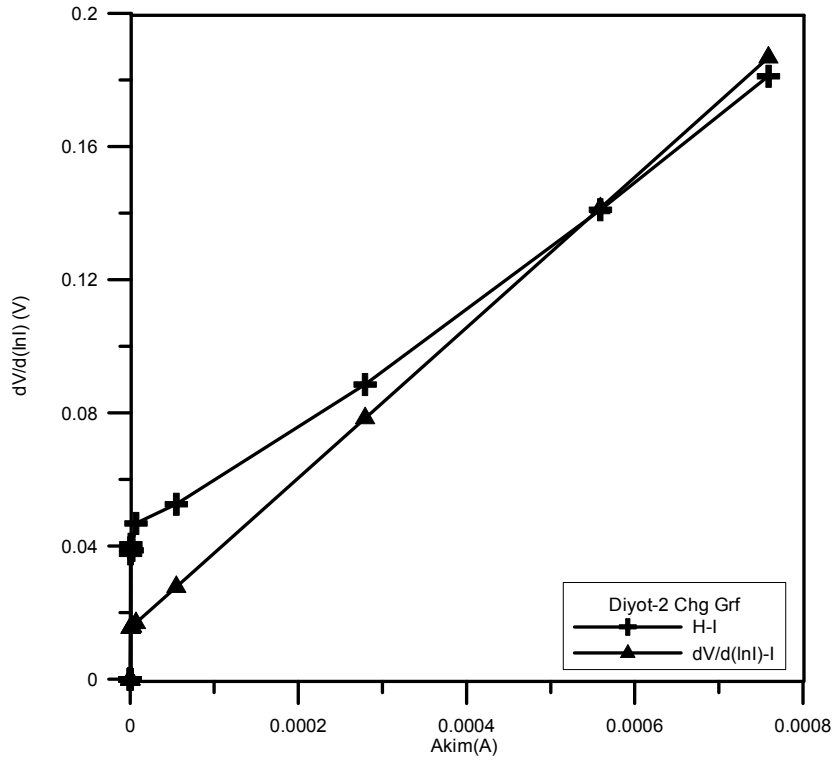
$$H(I) = n\phi_{Bn} + IR_s \quad (4.9)$$

denklemlerinden $dV/d\ln I$ -I ve $H(I)$ grafikleri çizildi. Bu grafiklerin eğiminden nötral bölge seri direnci bulundu. Aynı zamanda $dV/d\ln I$ grafiğinde doğrunun düşey eksenini kestiği nokta değeri e/kT değerine bölünerek n idealite faktörleri sırasıyla (Diyot1) için 1.32 ve (Diyot2) içinde 1.63 bulundu.

Bu doğruların eğiminden seri dirençler (Diyot1) için $17,2\Omega$ ve (Diyot2) içinde $11,58\Omega$ olarak hesaplandı.



Şekil 4.4. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyet 1'in $\ln I$ - V grafiğinden elde edilen Cheung Fonksiyonları $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I)-I$ grafiği.



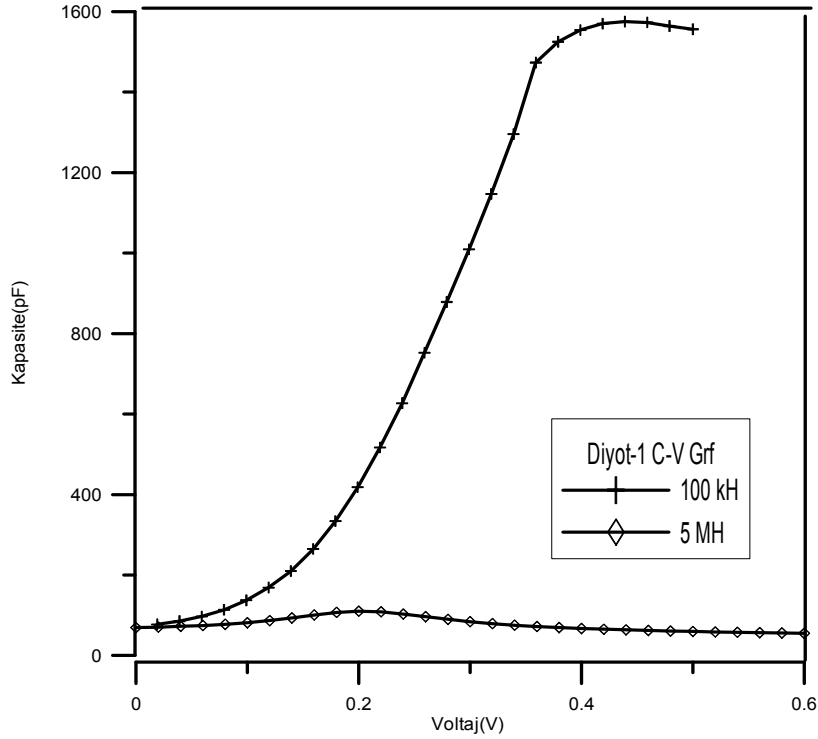
Şekil 4.5. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyet 2'nin $\ln I$ - V grafiğinden elde edilen Cheung Fonksiyonları $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I)-I$ grafiği.

4.5. Al-p, Si Schottky Diyotlarında C-V Karakteristikleri

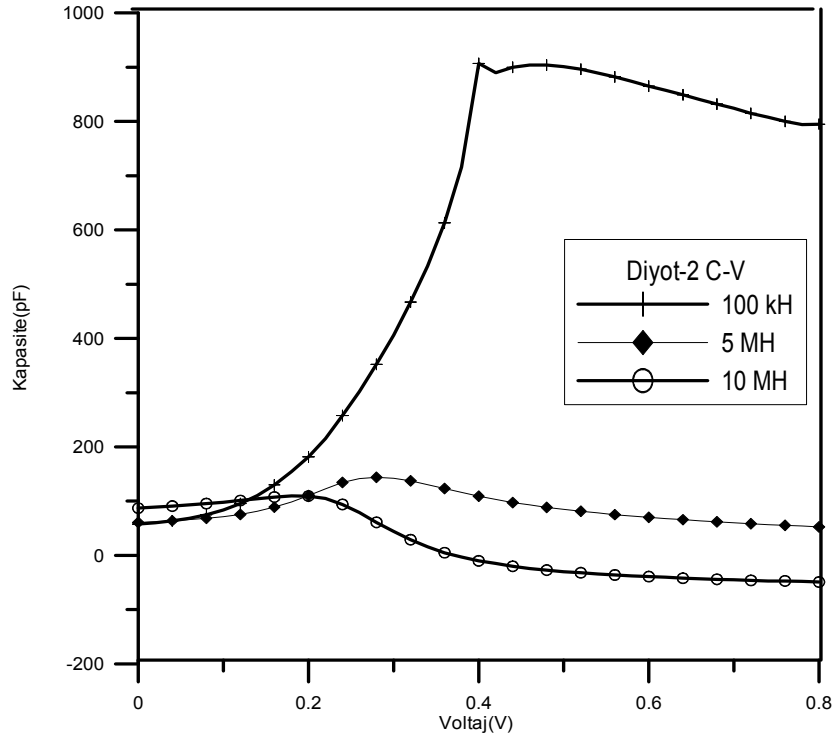
Al/-p-Si Schottky diyotların C-V ölçümleri Agilent 4294A 40 Hz–110 MHz Precision Impedance Analyzer” cihazı ile oda sıcaklığında (300^0K) de yapıldı. Diyot-1’in 100 kHz, Diyot-2’nin 100kHz, 5 MHz, 10 MHz, frekanslarda C-V ölçümleri alındı. C-V grafikleri çizildi. Her iki diyot için 5MHz de C-V grafikleri birlikte çizildi.

C-V grafiği incelendiğinde gözlenen piklerin pik ortalamalarının büyük voltajlara doğru kaydığı gözlenmiştir. Küçük voltajlarda daha büyük pik değerleri gözlemlendi.

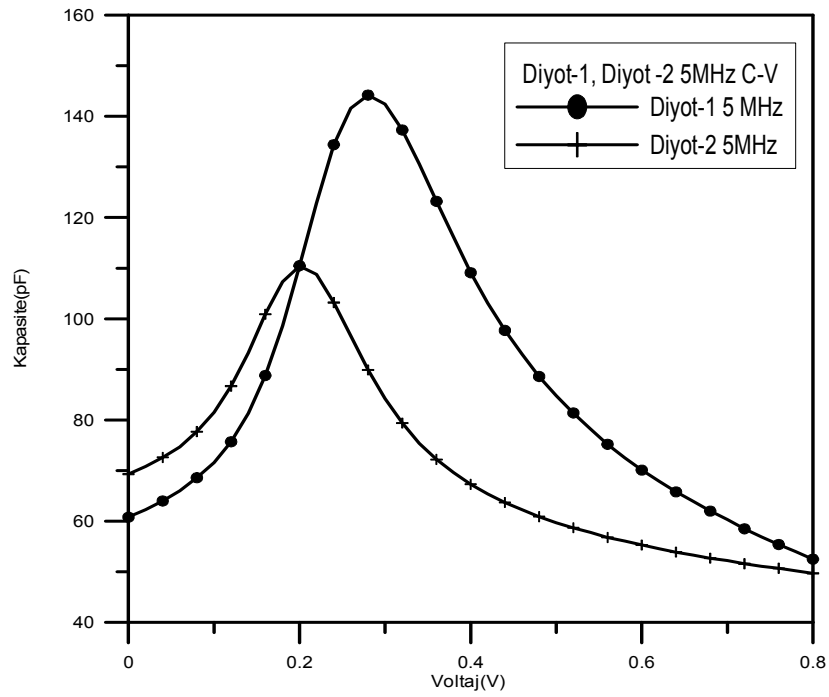
Her iki diyotun 5MHz C-V grafikleri karşılaştırılmasında pik değerlerin Diyot-1 için daha büyük değerler de olduğu ve hafif büyük değerlere kaydığı gözlemlendi.



Şekil 4.6. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyot-1’in 100kHz ile 5MHz arasındaki C-V değişimleri



Şekil 4.7. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyot 2'nin 100kHz, 5MHz ve 10MHz değerleri için C-V değişimleri

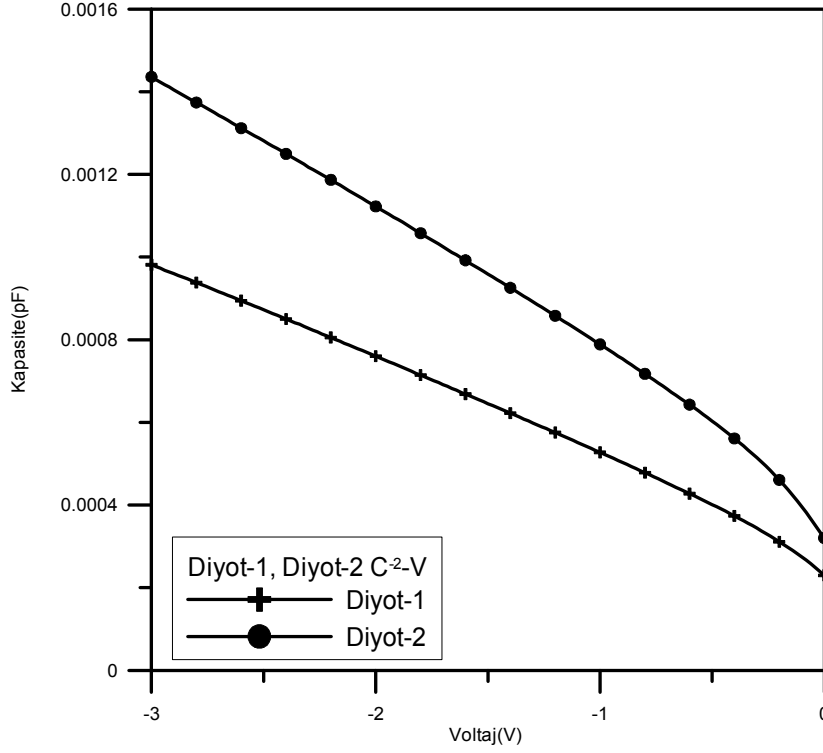


Şekil 4.8. Al/p-Si Schottky diyotlarında diyot-1'in 15MHz ve diyot-2'nin 25MHz değerleri için değişimi.

Al/p-Si diyotların 100kHz, 5MHz, 10MHz, 15 kHz ile 25 MHz aralığında 0 dan 0, 8 V'a kadar ölçüler alındı, C-V grafikleri çizildi. C-V grafikleri incelendiğinde artan frekansla gözlenen piklerin ortalamalarının büyük voltajlara doğru kaydığı ve yine grafikte büyük frekanslara gidildikçe piklerin küçük değerlere doğru gittiği gözlenir. Bu hal düşük frekanslarda arayüzey hallerinin A.C. sinyalini takip ettiğinden kapasiteye katkısı vardır dolayısıyla büyük pik vermektedir (Heine, 1965). Yüksek frekanslarda, ara yüzey halleri A.C. sinyalini takip edemediklerinden etkisi azalmakta ve kapasite arınma bölgesi kapasitesine yakın değerlere düşmektedir. (Chattopadhyay ve Raychaudhuri, 1993).

İkinci diyodun 100 kHz, 5 MHz ve 10 MHz frekanslarda C-V ölçümleri alındı. Bu değerlerdeki ölçümlerden faydalanılarak Şekil (4.9.) grafiği çizildi.

Al/p-Si diyotların 100 kHz, 5 MHz, 10 MHz, için 0 - 5 V aralığında kapasite-voltaj ölçümleri alındı. C-V grafikleri çizildi. C-V grafikleri incelendiğinde aynı frekanslara karşılık gelen Diyot-1 in kapasite pik değerlerinin Diyot-2 nin kapasite pik değerlerinden büyük olduğu gözlenir. Ayrıca her iki diyotta gözlenen piklerin pik ortalamalarının büyük voltajlara doğru hafif kaydığı gözlenir. Bu hal düşük frekanslarda arayüzey halleri A.C. sinyalini takip ettiğinden kapasite büyük pik vermektedir Heine, (1965). Yüksek frekanslarda, arayüzey halleri A.C. sinyalini takip edemediklerinden etkisi azalmakta ve kapasite arınma bölgesi kapasitesine yakın bir değer vermektedir (Chattopodhyay ve Ray Chaudhuri, 1992).



Şekil 4.9. Al/p-Si Schottky diyotlarında Diyet 1 ve Diyet 2'nin 1MHz frekansta - 3V ile 0V aralığında ters beslem C-V ölçülerinden elde edilen C^{-2} -V grafiği.

Diyotların 1 MHz frekansta ters beslem kapasitelerinden faydalanılarak çizilen C^{-2} -V grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

$$\frac{1}{n} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_D \left[\frac{d(C^{-2})}{dV} \right]} \quad (4.10)$$

denkleminde yerine yazılarak diyot idealite faktörlerinin diğer I-V ile bulunan değerleri ile uyum içinde olduğu görülür. Bu değeri $V = E_F = 0,30$ V değerini; C^{-2} -V grafiğinin yatay eksenini kestiği nokta kesişim potansiyeli her iki diyot için yaklaşık olarak $V_o = 0,8$ eV olarak tespit edildi ayrıca bu doğrunun eğimini

$$e\phi_{Bn} = \frac{1}{n}V_0 + E_f \quad (4.11)$$

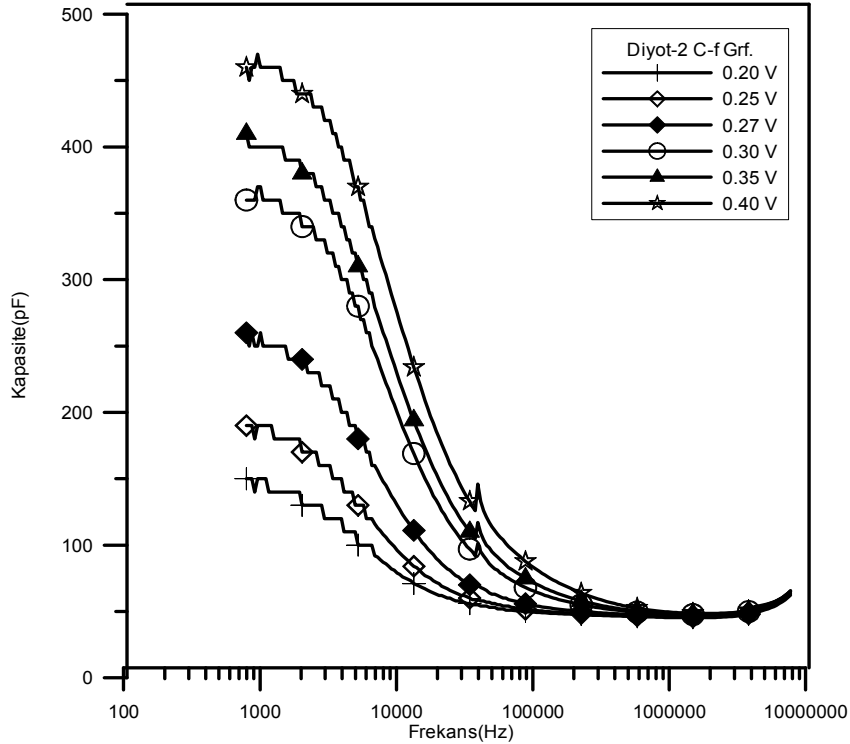
denkleminde yerine yazarak $e\Phi_{Bn}=0,76$ eV ve 0,75 eV olarak elde edilir.(3,43) denkleminde faydalanılarak $N_D=6.8.10^{14} \text{cm}^{-3}$ olarak bulunur.

4.6. Al-p/Si Schottky Diyotlarında C- f Karakteristikleri

Diyotların C- f karakteristikleri Al/p-Si diyotların 0,20; 0,25; 0,27; 0,30; 0,35; 0,40 V' ve 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 V için 0 - 5 V aralığında kapasite-frekans ölçüleri alındı, bunlara karşılık gelen C-f ölçümleri yapıldı. Bu ölçüm sonuçları Şekil (4,12)'deki ve şekil(4.13)'deki grafikler üzerinde gösterilmiştir.

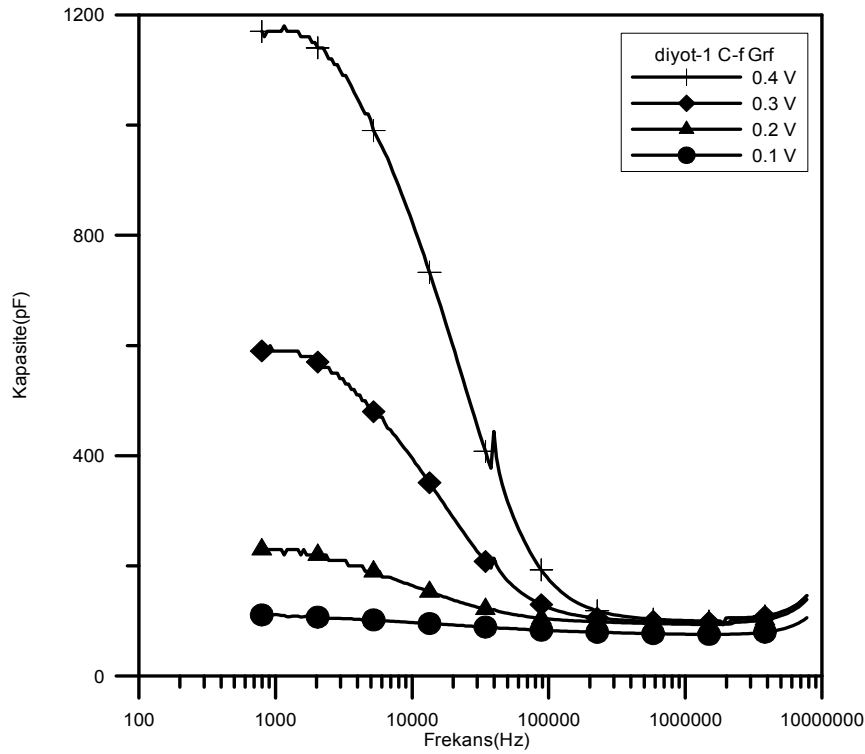
Bu grafikten düşük frekanslarda bir miktar artık kapasite izlenmiştir. Bu artık kapasitenin büyük voltajlara doğru arttığı gözlenir. Düşük frekanslardaki artık kapasitenin varlığı diyodun arayüzey hallerine ve omik kontak direncinin yüksek olmasına, yüksek frekanslarda AC sinyalinin takip edilmesinin zorluğuna atfedilir. (Türüt ve ark., 1996)

(Batı ve ark., 2000) Belli frekanstan sonraki artık kapasitenin $C_0=75\text{pF}$ olduğu gözlenir.



Şekil 4.10. Al/p-Si Schottky diyotlarında (Diyod 2)'nin 0,20V ile 0,40 volt aralığında C- f değişimi

Bu C-f eğrilerden anlaşıyor ki, düşük frekanslarda arayüzey halleri a.c. sinyalini takip ettiğinden artık kapasite vermektedir. Yüksek frekanslarda, arayüzey halleri a.c. sinyalini takip edemediklerinden etkisi azalmaktadır. Dolayısıyla toplam sığa ve sığanın pik değeri artan frekansla azalır. Ayrıca sığanın pik değeri artan frekans ile düşük voltajlara doğru kaymaktadır. Bu durum açıkça (Şekil 3. 9. a ve b) 'de görülmektedir. Arayüzey hallerinin a.c. sinyalini takip etmesinin seri direnç ile ters orantılı olduğu görüldü. Akım yoğunluğu arttığında seri direnç etkisi daha etkili olmakta ve bu yüzden kapasite azalmaktadır. Şekil 3.9. a ve b 'den görüldüğü gibi, seri direnç etkisi artan frekans ile daha belirgin bir şekilde kendisini hissettirmektedir.



Şekil 4.11. Al/p-Si Schottky diyotlarında (**Diyod 1**) 'nin 0,4V ile 0,1 V aralığında C- f değişimi

Düşük frekanslarda, arayüzey hallerinin diyot kapasitesine olan katkısından dolayı, seri direnç etkisi gözlenmemektedir. Artan frekanslarda, C-V eğrilerinde gözlenen pik Horvth ve ark. (1987) arayüzey hallerine, Werner ve ark. (1987) tarafından doğrultucu kontakta yapıya giren azınlık taşıyıcılarına ve Chattopadhyay ve Raychaudhuri, (1993) tarafından da yüksek frekanslarda seri direnç etkisine atfedildi. Bizim yaptığımız deneysel gözlemlerimiz

daha çok Chattopadhyay ve RayChaudrhuri'nin teorik sonuçları ile uyum içindedir. Yüksek seri direnç (R_s) değerleri için düşük frekanslarda bile kapasite piki gözlemlendi.

Her diyodun C-f eğrileri incelendiğinde diyotların ideallikten koptuğunu gösterir. C-f grafiklerinde yüksek voltajlardan düşük frekanslara karşılık gelen kısımlarda bir artış kapasite gözlenir. Bu Werner ve ark. (1988) ve arkadaşları tarafından düşük frekanslarda ara yüzey hallerinin a.c. sinyalini takip edebilmesine ve yüksek voltajlarda ara yüzey hallerinin a.c. sinyalini takip edememesine atfedildi. Batı ve ark.(2000)

Ayrıca Diyot 2'nin kapasite değerlerinin Diyot 1'den biraz daha büyük olması diyotların non idealliğine atfedilebilir.

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, Czochralski metoduyla büyütülmüş [100] doğrultulu, 500 μm kalınlıklı ve $\rho=13\ \Omega\text{-cm}$ öz dirençli p-tipi Silisyum (Si) kristali kullanılmıştır.

Bu çalışmada iki adet Al/p-Si/Al Schottky diyotu imal edildi. İki diyot da aynı p tipi Silisyum kristalinin parçaları olup aynı şartlarda kimyasal temizlik yapıldıktan sonra mat taraflarına Al buharlaştırıldıktan sonra 300 C derece de tavlanarak omik kontak yapıldı. Daha sonra numuneler buharlaştırma cihazına konarak parlak taraflarına Al buharlaştırılarak doğrultucu kontak yapıldı. Bu buharlaştırma hemen yapıldığı için metal ile yarıiletken arasında oluşan oksit tabakasının az olduğu söylenebilir. Böylece iki adet Al/p-Si/Al (MS) (Metal-Semiconductor) (Tataroğlu ve Altındal, 2006) Schottky diyotu olmuş oldu.

Diyotların, $\ln I$ -V (akım-gerilim) grafikleri -1.50 V ile 1.50 V arasında çizildi. Doğru beslem $\ln I - V$ grafiklerinin doğrusal kısmından faydalanılarak idealite faktörlerinin 1.32 ve 1.63 oldukları bulundu. $\ln I$ -V grafiğinin doğrusal olmayan kısmından faydalanılarak Cheung metodu ile $d(V)/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I Cheung fonksiyonları grafikleri çizildi. Bu grafiklerde idealite faktörleri sırasıyla 1.37 ve 1.62 oldukları hesaplandı. Diyotun, ters beslem (-3 V ile 0V arasında 1 MHz frekansta) C-V ölçümleri yardımıyla elde edilen C^{-2} -V grafiği çizildi.

Numunelerin Doğru beslem $\ln I$ -V grafiği, Cheung Fonksiyonu $d(V)/d(\ln I)$ -I grafiği ve ters beslem C^{-2} -V grafiklerinden idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplandı. Diyotun bu metotlarla ölçülen idealite faktörlerinin yukarıda verilen ölçüler ile uyuştukları gözlemlendi. Engel yükseklikleri diyet-1 için; doğru beslem halinde 0.80 eV ve ters beslem halinde 0.76 eV, diyet-2 için ise; doğru beslem durumunda 0.77 eV ve ters beslem durumunda 0.75 eV oldukları ölçüldü.

Diyotların $\ln I$ -V ve C^{-2} -V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörlerinin 1 den büyük olması bu şartlarda yapılan Al/p-Si diyetlerimizin doğru kontak tarafında metal ile yarıiletken arasında azda olsa bir yalıtkan (oksit) tabakasının olduğunu gösterir (Kumta ve ark.-2006). Genellikle bu hallerde metal ile yarıiletkenin ara yüzeyinde yaklaşık 10 Å kalınlığında bir yalıtkan (oksit) tabaka oluşur (Aguas ve ark.-2005). Dolayısıyla arayüzey halleri metal ile etkileşmezler (Chattopadhyay ve RayChaudrhuri, 1993; Card ve Rhoderick, 1973).

İdealite faktörlerinin birden büyük olmaları; omik kontak direncinin büyüklüğü, ara yüzey hallerinin yoğunluğu ve nötral bölgenin seri direncin büyüklüğü gibi faktörlerle doğru orantılıdır. (Chattopadhyay, 1992). Ayrıca MS Schottky diyetlerinin, engel yüksekliği ($e\phi$),

tuzak safsızlığına doğru orantılı olarak bağlı olduğu literatürde vardır Chattopadhyay ve Daw, (1996)

Al/p-Si diyotların Diyot-1 ve Diyot-2 'ın 0 ile 0,8 V aralığında 100 kHz, 5 MHz ve 10 MHz için C-V grafikleri çizildi. C-V grafiklerinde küçük frekanslarda daha büyük pikler gözlemlendi. Her iki diyot için 5 MHz e karşılık gelen C-V grafikleri incelendiğinde; aynı frekanslara karşılık gelen Diyot-1 in kapasite pik değerlerinin Diyot-2 nin kapasite pik değerlerinden büyük olduğu gözlenir. Bu büyük frekanslarda, arayüzey hallerinin ac sinyali iyi takip edilememesine atfedilebilir. Ayrıca sığanın pik değerleri artan frekans ile düşük voltajlara doğru kaymaktadır (Werner 1988).

Diyot-1' in 100 Hz ile 10^7 Hz aralığında 0.20, 0.25, 0.27, 0.30, 0.35, 0.40 V için C-f grafikleri çizildi. C-f grafikleri incelendiğinde Düşük frekanslarda artık kapasite gözlemlendi, yüksek frekanslara doğru diyotun esas kapasitesine doğru kaydığı görülür. Heine, (1965). Yüksek frekanslarda, arayüzey halleri A.C. sinyali takip edemediklerinden etkisi azalmakta ve kapasite arınma bölgesi kapasitesine yakın bir değer vermektedir Chattopodhyay ve RayChaudhuri, (1993). C-f grafiklerinde küçük frekanslarda, küçük voltajlarda görülen artık kapasite (Werner ve ark., 1988) omik kontak direncine de bağlı olduğu ifade edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aguas H., Goullet A., Pereria L., Fotunato E., Martins R., 2005 Effect of the tunnelling oxide thicknnes and density on the perfoemance of MIS photodiodes. *Thin Solid Films*, (451-452) 361-365
- Ayyıldız, E., Batı, B., Temirci, C., Türüt, A., 1999. Dependence of Thermal Annealing on the Density Distrebuton of İnterface States in Ti/n-GaAs(Te) Schottky Diodes, *Applied Surface Science*, **152** (1):57-62
- Bardeen, J., 1947. Metallisation and Metal-Semicomductor İnterface States. *J. Phys. Rev.*, (A), 710- 717
- Barret, C., Vapaielle, A., 1979. Interface States in a Cleaved M-S Junction. *J. Apple .Phys*, **50**(6):313-314.
- Batı, B., 1993. *Al-Sb/n-Si/Cu Schottky Diyotlarında Seri Direncin I-V ve C-V Karakteristiklerine Etkileri*. (yüksek lisans tezi basılmış). Y.Y Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Batı, B., 1999. *İdeal ve İdeal Olmayan Omik ve Doğrultucu Kontaklı Au/n-Si Schottky Diyotlarında Doğru Beslem Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri* (doktora tezi basılmış). A Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Batı, B., Nuhoğlu, Ç., Sağlam, N., Türüt, A., 2000. On The Forward Bias Excess Capacitance at Intimate and MIS Schottky Barrier Diodes With Perfect Ohmic Back Contact. *Physica Scripta*, **53**:209-212.
- Bethe, H. A., 1981. *Theory Of The Boundary Layer Of Crystal Rectifiers*. *Mass. Ins. Techno. Radia Lab Reba*. (1942) 43-12 s.
- Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1973. The Effect of Interfacial Layer on Minorty Carrier Injection in Forward Biased Slicon Schottky Diodes. *Solid-State Electron*, **16**(3)365-374.
- Chandra, M.M., Parsad, M.J., 1986. Simple Interface Layer Model For The Nonideal Characteristics of The Schottky Diodes. *Phy D.App Phys.*, **19**(1):89-93
- Chattopadhyay, P., 1996. Capacitance Technique for the Determination of Interface States Density of Metal-Semiconductor Contact. *Solid-State Electron*. **39**(10):1491-1493.

- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1992. Origin of the Anomalous Peak In The Forward C-V Plot of a Schottky Barrier Diodes. *Solid-State Electron*, **35**(6):875-878.
- Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency Dependence of Forward Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. *Solid-State Electron*, **36**(4): 605 -610
- Cheung, S.K., Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode Parameters From Forward Current-Voltage Characteristics. *Appl Phys. Lett.* **49**(2):85-90.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965. Tungsten Semiconductor Schottky Barrier Diodes. *Transaction of The Metallurgical Soc* *J. Appl. Phys.* **36**(8):321-326
- Daw, K., Chattopadhyay, P., 1991. Control of Barrier Height of MIS Tunnel Diodes Using Deep Level Impurities. *Solid-State Electron*, **34**(2):367-371.
- Deneuville, A., Gerard, P., Kerade, J. P., 1972. D.C. Electrical, Optical and Photoelectrical Properties of $\text{Ge}_x\text{T}_{1-x}$ Amorphous Thin Films. *Solid State Communications*. Vol, **14**(4):341-346.
- Evans, H. L., Wu, X., Yang, E. S., Hoi, P. K., 1985. Electronic States at Silicon Interfaces. *Phys. Rev Lett*, **56**(2):177-180.
- Gamila, G., and Rubi, J.M., 1997. Analysis of Current Voltage Characteristics of Inhomogeneous Schottky Diodes. *J. Appl. Phys.* **81**(6) 2674 -2678.
- Heine, V., 1965. Calculation of The Optical absorption Between Surface States of Silicon. *Surface Science*. **43**(2):417-430.
- Horvath, J., Zs., Memeth, M., Gyuro, I., 1987. *5th International School on Physical Problems in Microelectronics*. Varna. Bulgaria.
- Kumta A., Rusli E., Chin-Che Tin., Ahn J. 2006 Design of field-plate terminated 4H-SiC Schottky diodes using high- k dielectrics. *Microelectronic reliability* **46**(8):1295-1302
- Osvald, J., Kuzmik, J., Konstantinidis, G., Lobotka, P., 2005. Temperature Dependence of GaN Schottky Diodes I-V Characteristics. *Microelectronic Engineering*, **81**(1):181-187.
- Rideout, V.L., 1978. A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers *Thin Solid Films*, **48**(3):261-291.

- Schottky, W., Spenke, E., 1939. *Wiss. Veroff. Siemens- Werken*, 18, 225 s
- Sze, S.M., 1981. *Physics Semiconductor Devices*, 2nd Edition. Wiley. New York. p274, 276
- Sze, S.M., Crowel, C.R., Khang, D., 1964. **Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures** *J. Appl. Phys*, 8(12):979-990.
- Tataroğlu A., Altındal Ş. 2006 Characterization of Current –Voltage (I-V) and capacitance-voltage-frequency (C-V-f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. **83(3):582-588.**
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. The Effect Ohmic Contact Receptivity in The Au/n-Si Schottky Diodes on The Capacitance-Frequency (C-f). **F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 13(1): 33-38.**
- Torrey, H.C., Whitmer, C.A., 1874. Crystal Rectifiers. *Mc Graw Hill. London* 36- 657 s.
- Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M., 1996. Parameter Extraction From Non-ideal C-V Characteristics of a Schottky Diode With and Without Interfacial Layer. *Solid-State Electron*, 35(2):835-840.
- Werner, J., Tung, R.T., Levi, A. F.J., Anzlovar, M., 1987. Admittance Measurements at Epitaxial and Nonepitaxial Silicide Schotky Diodes. *Mat. Res. Symp. Proc.* 91, 433.
- Werner, J., Tung, R.T., Levi, A. F.J., Anzlovar, M., Pinto, M., 1988. **Origin of Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts.** *Phys. Review Lett*, 60(1):53-56.
- Wilson, A. N., 1983. *Stress and Stability in Coal Ribside and Pillars*. Yay. No:831145. West Wirigina Üniv. Wirigina.
- Wu, X., Yang, H.L., 1989. **Interface Capacitance İn Metal Semiconductor Junetions.** *J. Appl. Phys.* 65(1):3560-3565.
- Ziel A.V., 1968. *Solid State Physical Electronics Prentice-Hall*, New-Jersey, 245 s.

ÖZ GEÇMİŞ

İkram KELEŞ, 1973 yılında Bitlis'in Adilcevaz İlçesinde doğdu. İlköğrenimini Erciş Erkek YİBO'da, orta öğrenimini Bitlis Anadolu Öğretmen lisesinde tamamladı. 1991 yılında Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik Bölümüne girdi. 1995 yılında mezun oldu. 1995 yılında Şırnak-Beytüşşebap Lisesi, Van Atatürk Lisesi, Erciş İbni Sina İ.Ö.O, Erciş Kız Meslek Lisesi ve 1999'da itibaren Erciş Sevim Kürüm Anadolu lisesinde Fizik Öğretmeni ve idareci olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.