

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL-SİLİSYUM SCHOTTKY DİYOTLARIN
I-V ve C-V KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Mustafa OKUTAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2001

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL-SİLİSYUM SCHOTTKY DİYOTLARIN
I-V ve C-V KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Mustafa OKUTAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı
Doç.Dr. Engin BAŞARAN

GEBZE
2001

Mustafa OKUTAN 'ın tez çalışması G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun..... tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan juri tarafından **FİZİK** Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE : **Doç. Dr. Engin BAŞARAN**
(Tez Danışmanı)

ÜYE : **Yrd. Doç. Dr. M. Hasan ASLAN**

ÜYE : **Yrd. Doç. Dr. A. Yavuz ORAL**

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İmza/Mühür

ÖZET

Bu çalışmada, Schottky kontak oluşturmak için termal buharlaştırma yöntemiyle n-tipi ve p-tipi Si(100) alttabanlar üzerine farklı çaplarda Cu (bakır) ve Ag (gümüş) kaplamaları yapılmıştır. Bunlardan bazı alttabanların arkasına omik kontak amacıyla Al (alüminyum) kaplanmıştır. Oluşturulan bu Al kaplamalardan bazılarına tavlama yapılmıştır.

Elde edilen kontakların elektriksel özellikleri akım-voltaj ve kapasitans-voltaj teknikleri ile incelenmiştir. Alttabanların arka taraflarına yapılan Al kaplamalarının omik kontak oluşumunda gerekli olduğu elde edilen daha iyi deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Eklem oluşumunda, engel yüksekliği etkisinin çok az veya hiç olmadığı deneysel olarak görülmüştür. Engel yüksekliğinin metalin cinsine göre değiştiği ve ideallik parametresinin de metalin cinsine bağlı olmadığı doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, arayüzeyde Fermi seviyesinin değerlik bandı kenarına göre sabitlendiğini göstermektedir. Eklem tayininde en belirgin parametrelerden olan potansiyel engel yükseklikleri, ideallik faktörleri, taşıyıcı konsantrasyonları ve omik/schottky yapı özellikleri hakkında incelemeleri yapılmış ve en kararlısı belirlenmiştir. Teorik hesaplamalar deneysel sonuçlarla uyum sağlamıştır. Cu ‘nun Ag ‘den daha iyi bir Schottky kontak özelliği sağladığı gözlenmiştir.

SUMMARY

In this work, Cu and Ag contacts are formed on p- and n-type Si(100) substrates at various diameters by thermal evaporation technique to establish Schottky contacts. Al coatings are formed on back side of some substrates for ohmic contact. Some of these Al coatings are also annealed.

Electrical properties of the contacts are explored by current-voltage and capacitance-voltage techniques. It has been shown that Al coatings are necessary to obtain ohmic behaviour of the back side of the substrates.

The effect of barrier height is almost not affected by the formation of the junctions. It is confirmed that barrier heights are changed by the type of metal and, ideality parameters are not dependent on the metal type. These results suggest that the Fermi level at the interface is pinned relative to the valance-band edge. Investigation of potential barrier heights, ideallity factors, concentration of carriers, and Ohmic/Schottky structure properties which are most evident parameters for indication of contacts is performed and the most stable one is defined. Theoretical results are mached with the experimental ones. It was observed that Cu on Si forms a better Schottky contact than Ag.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen başta danışman Hocam Doç. Dr. Engin Başaran 'a, Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Bekir Aktaş 'a ve kıymetli Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR	2
2.1. Schottky Engeli	2
2.2. Schottky Diyotlarda İdeallikten Sapmalar	6
2.3. Schottky Diyot Kapasitansı ve Beslemeye Bağımlılığı	8
2.4. Schotky Diyotların Kullanım Alanları ve Uygulamaları	11
2.5. Omik Kontak	12
3. METAL-YARIİLETKEN KONTAK TEORİSİ	16
3.1. Akım Transfer Mekanizması	18
3.1.1. Termoiyonik Yayılma Teorisi	19
3.1.2. Difüzyon Teorisi	21
3.1.3. Termoiyonik Yayılma-Difüzyon Teorisi	23
3.2. Engel Yüksekliğinin Tanımlanması	25
3.2.1 Akım-Voltaj Ölçümü	26
3.2.2. Kapasitans-Voltaj Ölçümleri	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	31
4.1. p ve n tipi Si Kristalleri Özellikleri	31
4.2. Maskelerin Hazırlanması	31
4.3. Alttabanların Kesimi ve Kimyasal Temizlenmesi	32
4.4. Termal Buharlaştırma İşlemi ile Kontak Oluşturma	33
4.5. I-V Ölçümü Düzenegi	36
4.6. C-V Ölçümü Düzenegi	37

5. SCHOTTKY-ENGEL DİYOT KARAKTERİSTİĞİ	39
5.1. Teorik Hesaplamalar	40
5.2. I-V Karakteristiği ve Grafikleri	43
5.3. C-V Karakteristiği ve Grafikleri	48
5.4. Diyot Parametreleri Hesaplaması	53
5.4.1. İdeallik Faktörü	53
5.4.2. Engel Yüksekliği	56
5.4.3. Yarıiletken Tarafındaki Engel Yüksekliği	60
5.5. Deneysel Verilerin Teorik Değerlerle Karşılaştırılması	63
6. SONUÇLAR/ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ϕ_m	: Metal iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletken iş fonksiyonu
F	: Kuvvet
E	: Dış elektriksel alan
PE	: Toplam potansiyel enerji
q	: Elektriksel yük
x	: Uzunluk
ϵ_0	: Serbest uzay geçirgenliği
ϵ_s	: Yarıiletken uzay geçirgenliği
$\Delta\phi$	: Engel azaltıcı görüntü kuvveti
Δ	: Arayüzeyssel tabakadaki potansiyel
ϕ_B	: Potansiyel engel yüksekliği
ϕ_{Bn}	: Metal-n-tipi yarıiletken engel yüksekliği
ϕ_{Bo}	: Başlangıç elektrik alanında ϕ_{Bn} nin asimptotik değeri
ϕ_o	: Yüzeydeki enerji düzeyi
V_i	: Elektrostatik potansiyel
E_i	: Boşluktaki elektriksel alan
V_{bi}	: Birikme potansiyeli farkı ("built-in" potansiyel)
ϵ_s	: Yarıiletken dielektriği
ϵ_i	: Arayüzeyssel tabaka dielektriği
δ	: Arayüzeyssel tabakanın kalınlığı
χ	: Yarıiletken elektron etkinliği
k	: Boltzmann sabiti
n	: İdeallik faktörü
T	: Sıcaklık
A^*	: Richardson sabiti
A	: Kontak alanı
m^*	: Yarıiletkenin etkin kütlesi
$N(E)$	: Durum yoğunluğu

$F(E)$	: Dağılım fonksiyonu
$E(x)$	: Enerji
v_x	: Transfer yönü taşıyıcı hızı
E_g	: Yasak enerji aralığı
E_F	: Fermi enerjisi
E_F^S	: Yarıiletken fermi seviyesi
E_F^m	: Metal fermi seviyesi
E_F^i	: Düşük katkı yoğunluğundaki fermi enerjisi
E_C	: İletkenlik bandı seviyesi
E_V	: Değerlik bandı seviyesi
n	: n-tipi yarı iletkendeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu
p	: p-tipi yarı iletkendeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu
p_n	: n-tipi yarıiletkenin azınlık taşıyıcı yoğunluğu
n_i	: Düşük katkı mertebelerindeki yük taşıyıcılarının yoğunluğu
n_m	: Akım varken elektron yoğunluğu
n_0	: Sözd-e-denge elektron yoğunluğu
R	: Yüzey direnci
R_S	: Seri direnç
R_C	: Omik kontak direnci
V	: Uygulanan Voltaj
I	: Akım
J	: Arınma bölgesi akım yoğunluğu
J_0	: Doymuş akım
J_h	: Delik akım yoğunluğu
J_{re}	: Üretim/yeniden birleşim akım yoğunluğu
J_n	: Elektron akım yoğunluğu
J_{SD}	: Difüzyon teorisi için doymuş akım yoğunluğu
J_{ST}	: Termoiyonik yayılma teorisi için doymuş akım yoğunluğu
D_p	: Delik difüzyon sabiti
ρ	: Yüzey öz direnci
$\mathcal{E}(x)$	: İç elektriksel alan
Q_d	: Uzay-yük yoğunluğu
W	: Arınma bölgesi genişliği

C	: Kapasitans
$N(x)$	: Katkı yoğunluğu
N_d	: Arınma bölgesindeki net katkı yoğunluğu
N_C	: İletkenlik bandı etkin durum yoğunluğu
N_V	: Değerlik bandı etkin durum yoğunluğu
N_t	: Tuzak yoğunluğu
N_D	: Verici safsızlık yoğunluğu
N_A	: Alıcı safsızlık yoğunluğu
Q_{SC}	: Yarıiletken uzay-yük yoğunluğu
Q_{SS}	: Yarıiletkenin yüzey-durum yoğunluğu
Q_M	: Metalin yüzey-yük yoğunluğu
ϕ_{b0}	: Sıfır voltajdaki potansiyel engel yüksekliği
ϕ_e	: Etkin engel yüksekliği
V_n	: n-tip yarıiletkenin iletkenlik bandı ile fermi seviyesi arasındaki fark
$q\phi(x)$	: Quasi-fermi seviyesi
$q\psi(x)$	: Elektron potansiyel enerjisi
kHz	: kilohertz
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz
mm	: Milimetre
kÅ	: KiloAngstrom

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1 Boşluk ve metal yüzey arasındaki enerji-bant diyagramı. Metalin iş fonksiyonu $q\phi_m$ 'dir. Yüzeye elektrik alan uygulandığında etkin iş fonksiyonu (veya engeli) azalır. Bu azalma, alan ve görüntü-kuvvetinin birlikteki etkisinden ileri gelir.	3
2.2 Metal-yarıiletken arasındaki engel yapısı (a) nötür ve ayrılmış, (b) elektrikle bağlantılı, (c) dar aralıkla ayrılmış, (d) en iyi kontak biçimi. Buradaki $\bullet$ iletkenlik bantı elektronları anlamına; $+$ verici iyonlar anlamına gelmektedir.	4
2.3. Metal-yarıiletken kontağı arasındaki bant yapıları ve Schottky engeli oluşumu.	6
2.4 Schottky diyot eşdeğer devresi	7
2.5 Farklı beslemeler altında n-tipi ve p-tipi yarıiletken ile metalin enerji-bant çizelgeleri (a) Isısal dengede. (b) İleri beslemede. (c) Geri beslemede.	10
2.6 Bir n-p-n bipolar transistöre bağlanmış Schottky diyot kenetleyici.	11
2.7. Metal ve n-tipi yarıiletken arasındaki omik kontak gösterimi ($\phi_m < \phi_s$), (a) Kontakten önceki durum, (b) İyi özellikteki kontak durumu.	12
2.8. Metal ve p-tipi yarıiletken arasındaki omik kontak gösterimi ($\phi_m > \phi_s$), (a) Kontakten önceki durum, (b) İyi özellikteki kontak durumu.	13
2.9. Metal-yarıiletken kontağı arasındaki bant yapıları ve omik kontak oluşumu,	15
3.1. Schottky engelinin tipik I-V karakteristiği (a) doğrusal akım grafiği ve (b) logaritmik akım grafiği.	17
3.2 İleri besleme altında dört temel transfer mekanizması [Rhoederick, 1988].	18
3.3. Schottky etkisi enerji-bant çizelgesi birleşimi. Elektron potansiyel enerjisi $q\psi(x)$ ve quasi-fermi seviyesi $q\phi(x)$.	24

3.4. Metal ile n-tipi yarıiletken kontak arasındaki enerji-bant diyagramı, burada arada atomik boyutta bir arayüzeysel tabaka var. ϕ_M = Metalin iş fonksiyonu, ϕ_{Bn} = Metal-yarıiletken engel yüksekliği, ϕ_{Bo} = Sıfır elektrik alanında ϕ_{Bn} nin asimptotik değeri, ϕ_o = Yüzeydeki enerji düzeyi, $\Delta\phi$ = Engel azaltıcı görüntü-kuvveti, Δ = Arayüzeysel tabakadaki potansiyel, χ =Yarıiletken elektron etkinliği, V_{bi} = Birikme potansiyeli, ϵ_s = Yarıiletken dielektriği, ϵ_i = Arayüzeysel tabaka dielektriği, δ = Arayüzeysel tabakanın kalınlığı, Q_{sc} = Yarıiletken uzay-yük yoğunluğu, Q_{ss} = Yarıiletkenin yüzey-durum yoğunluğu, Q_M = Metalin yüzey-yük yoğunluğu. 26

3.5. Al-GaAs diyot için logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ 'nin karşı V 'ye karşı grafiği [Missous and Rhoderick, 1986]. 28

3.6 W-Si ve W-GaAs diyot için $1/C^2$ karşı uygulanan voltaj [Crowell, Sarace and Sze, 1965]. 29

3.7 (a).Yüzey katkılanma seviyesi ve derin verici seviyesine ait bir yarıiletkeni göstermektedir. N_D ve N_T yüzey verici ve derinlik verici yoğunluğunu ifade ediyor, **b)** $1/C^2$ 'nin farklı frekanslarda V 'ye karşılık gelen değerlerini göstermektedir [Roberts and Crowell, 1973]. 30

4.1 Metal(omik)–Yarıiletken-Metal(doğrultucu) eklemlerin hazırlanması işlemi aşamaları. 31

4.2. Metalik(fosfobronz) maske. 32

4.3. İnce film katkılanma işleminin şematik gösterimi 33

4.4. Kaynak malzemeyi buharlaştırmada kullanılan tungsten bot ve tel sarım. 34

4.5. Hazırlanan Metal(Omik)-Yarıiletken-Metal(doğrultucu) kontak çeşitleri. 35

4.6. Akım-Voltaj ölçüm düzeneği (a), cihazda test edilecek örnek tutucu kısmı (b) ve KEITHLEY Model 2400 Kaynak Ölçüm sistemi çalışma prensibi (c). 37

4.7. Kapasitans-Voltaj ölçüm düzeneği ve cihazda test edilecek örnek tutucu kısmı. 38

5.1. Metal/yarıiletken eklemeleri besleme pozisyonları.	39
5.2. Silisyumun öz direncine karşı katkı yoğunluğu, 300K.	41
5.3. Metal (Al 450 °C 15 dk)/ <i>p</i> -tipi Si/ Cu veya Ag eklemi <i>I-V</i> grafiği.	44
5.4. Metal/ <i>p</i> -tipi Si/ Cu veya Ag eklemi <i>I-V</i> grafiği.	44
5.5. <i>p</i> -tipi Si/ Cu veya Ag eklemi <i>I-V</i> grafiği.	45
5.6. Metal (Al 450 °C 15 dk)/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu veya Ag eklemi <i>I-V</i> grafiği.	45
5.7. Metal/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu veya Ag eklemine ait <i>I-V</i> grafiği.	46
5.8. <i>n</i> -tipi Si/ Cu eklemi <i>I-V</i> grafiği.	46
5.9. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ <i>p</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	49
5.10. Metal(Al)/ <i>p</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	49
5.11. <i>p</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	50
5.12. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	50
5.13. Metal (Al)/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	51
5.14. <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>C-V</i> grafiği.	51
5.15. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>ln(I)-V</i> grafiği.	54
5.16. Metal (Al)/ <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>ln(I)-V</i> grafiği.	54
5.17. <i>n</i> -tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait <i>ln(I)-V</i> grafiği.	54

- 5.18.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ - V grafiği. 55
- 5.19.** Metal (Al)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ - V grafiği. 55
- 5.20.** *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ - V grafiği. 55
- 5.21.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 1mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 57
- 5.22.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si /Cu (kontak çapı 2mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 57
- 5.23.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 1mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 58
- 5.24.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 2mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 58
- 5.25.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Ag (I1,1mm ve I2, 2mm kontak çaplı) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 59
- 5.26.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Ag (I1,1mm ve I2, 2mm kontak çaplı) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği. 59
- 5.27.** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği. 60
- 5.28.** Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu (D Serisi) veya Ag (C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği. 61
- 5.29. (c)** Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği. 61
- 5.30.** Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu (D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği. 62

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
3.1 n-tipi yarıiletkenler üzerine bazı metallerin (eV olarak $q\phi_{Bn}$) 300 K' de engel yükseklikleri.	16
3.2. Richardson sabitleri (A^*) Si, Ge ve GaAs için genel kullanılan değerler (A/cm^2-K^2).	17
4.1. Schottky eklemde kullanılan Si kristalinin özellikleri.	31
4.2. Malzemelerin buharlaşma karakteristiği (buharlaşma basıncı 10^{-4} torr).	34
4.3. Örneklerin hazırlanma şekillerine göre belirlenmesi.	36
5.1. Si 'a özgü sabitler (300 K).	40
5.2. Eklemlerin deneysel olarak hesaplanmış ideallik faktörleri (I1, 1mm çaplı ekleme ait, I2, 2mm çaplı ekleme ait değer).	56
5.3. Eklemlerin deneysel olarak hesaplanmış potansiyel engel yükseklikleri (I1, 1mm çaplı ekleme ait, I2, 2mm çaplı ekleme ait değer).	56
5.4. Eklemlerin deneysel olarak hesaplanmış “built-in” potansiyeli (V_{bi}) (1 ve 2 mm çaplı eklemlere ait).	62
5.5. Diyot parametrelerine ait farklı uygulamalarda bulunan değerler ile teorik sonuçlar.	63-64

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontaklar, omik veya doğrultucu kontaklardır; yada bu ikisinin arasında özellik gösterirler. Metal ve yarıiletken malzemelerin birbirine teması sonucu oluşurlar. Omik kontaklar, yarıiletken malzemelerin diğer devre elemanlarıyla bağlantısını gerçekleştirmede kullanılmak zorundadır. Doğrultucu kontaklar diğer ifadesiyle Schottky-engel diyotlar tek yönlü akım geçiren ve bu özelliği ile çok yaygın kullanım alanı bulan cihazlardır.

Metal-yarıiletken kontaklar ile ilgili ilk bilgiler, metal kontaklar ve yarıiletkenler arasındaki elektriksel iletkenliğin simetrik olmayan özelliklerini bulan Braun' un [Braun, 1874] çalışmalarına dayanmaktadır. Çalışma mekanizması iyi anlaşılmamış olsa da nokta-kontakt doğrultucular [Bose, 1904] 'ten itibaren uygulama alanları buldular. Katıların bant teorisine dayalı yarıiletkenler ile ilgili çalışmalar ardından metal yarıiletken kontaklara uygulandı [Wilson, 1931]. Potansiyel engelin kimyasal bir tabaka oluşmaksızın bizzat yarıiletkendeki kararlı uzay yüklerinden ortaya çıkabileceğini ileri sürdü [Schottky, 1938]. Bu düşünceye dayanarak kurulan model Schottky engeli olarak bilinir. Yine aynı yıl bağımsız olarak Mott' da, Mott engeli olarak bilinen ve potansiyel engelinin, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını bir teori ile ortaya koydu [Mott, 1938]. Bethe 'nin 1942 'de ortaya koyduğu önemli bir katkı olan termoiyonik-yayma teorisine göre akım, Mott ve Schottky 'nin varsaydığı gibi yarıiletkendeki sürüklenme ve difüzyondan ziyade elektronların metale emisyon süreciyle belirlenmektedir [Bethe, 1942]. Bardeen bu teoriyi deneysel sonuçlara uygulamıştır [Bardeen, 1947]. Bu teori daha sonra Crowell ve Sze tarafından geliştirilmiştir [Crowel and Sze, 1966]. Son 30 yıldır Schottky engellere dayalı bileşenler mikroelektronikte gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Engel oluşumunun ve metal-yarıiletken arayüzeyden akım geçişi fiziğinin tam olarak anlaşılması için araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Bu çalışmada 2. bölümde Omik ve Schottky kontaklarla ilgili temel konular yer almaktadır. Teorik konular 3. bölümde ve deneysel çalışma ile ayrıntılı bilgiler 4. bölümde verilmektedir. Bakır ve gümüş ile n- ve p-tipi Silisyum Schottky kontakların elde edilen I-V ve C-V karakteristikleri Alüminyum omik kontaklarla ve kontaksız olarak tüm deneysel sonuçlar ve tartışma 5. bölümde verilmektedir. Son bölümde sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

2. METAL-YARIİLETKEN KONTAKLAR

2.1. Schottky Engeli

Schottky etkisi, elektrik alan uygulandığında yüklü taşıyıcı yayımı için potansiyel enerjinin görüntü-kuvvetinin oluşturduğu azalmadır. Önce metal-vakum sistemini dikkate alalım. İş fonksiyonu ($q\phi_m$) Şekil 2.1 'de gösterildiği gibi bir elektronun Fermi düzeyindeki başlangıç enerjisinden vakum ortamına geçmesi için gerekli minimum enerjidir. Metaller için, $q\phi_m$ yaklaşık 2-6 eV arasında değişir ve genellikle yüzey kirliliğine oldukça duyarlıdır.

Metalden x mesafesindeki bir elektron, metal yüzeyinde pozitif bir yük oluşturacaktır. Elektron ve oluşan pozitif yük arasındaki çekim kuvveti, elektron ile $-x$ 'de bulunan eşit bir pozitif yük arasındaki kuvvete eşdeğerdir.

Bu pozitif yük görüntü yüküdür ve görüntü kuvveti denilen çekici kuvvet şu şekilde verilir [Sze, 1981]:

$$F = \frac{-q^2}{4\pi(2x)^2 \epsilon_0} = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_0 x^2} \quad (2.1)$$

burda ϵ_0 serbest uzay geçirgenliğidir. Sonsuzdan x noktasına kadar taşınması sırasında bir elektronun yaptığı iş,

$$E(x) = \int_{\infty}^x F dx = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x}. \quad (2.2)$$

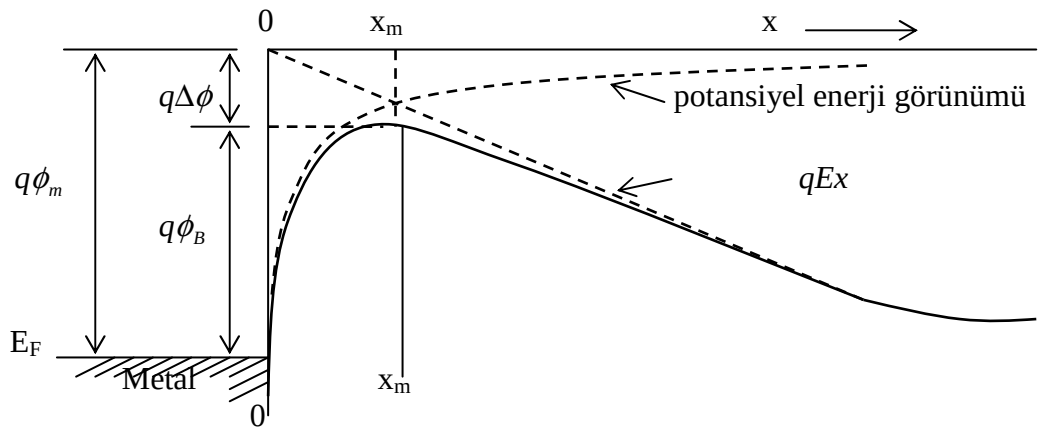
ile verilir. Yukarıdaki enerji, Şekil 2.1 'de gösterilen, x uzaklığındaki bir elektronun potansiyel enerjisine karşılık gelir.

Bir E dış alanı uygulandığında, toplam potansiyel enerji (PE), mesafesinin fonksiyonu olarak,

$$PE(x) = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_0 x} + qEx \quad (\text{eV}). \quad (2.3)$$

toplamı ile verilir.

Schottky engelini azalması $\Delta\phi$ ve x_m konumunun azalması (Şekil 2.1 'de gösterildiği gibi), $d[PE(x)]/dx = 0$ koşulu ile verilir, ya da,



Şekil.2.1 Boşluk ve metal yüzey arasındaki enerji-bant diyagramı. Metalin iş fonksiyonu $q\phi_m$ 'dir. Yüzeye elektrik alan uygulandığında etkin iş fonksiyonu (veya engeli) azalır. Bu azalma, alan ve görüntü-kuvvetinin birliktaki etkisinden ileri gelir.

$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_0 E}} \quad (\text{cm}) \quad (2.4)$$

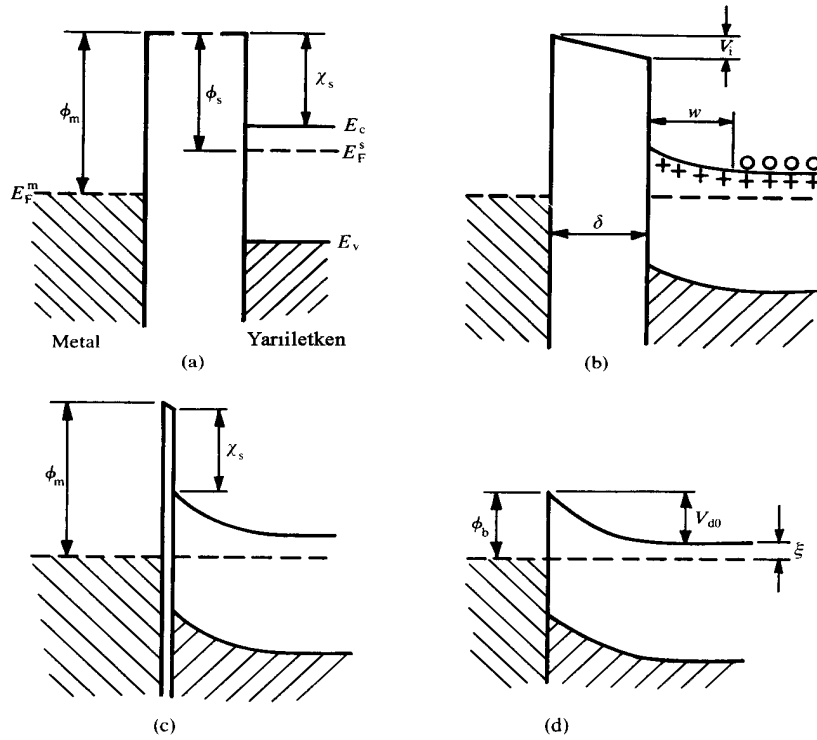
$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_0}} = 2Ex_m \quad (\text{V}). \quad (2.5)$$

Bu sonuçlar metal-yarıiletken sistemlere de uygulanabilir. Ancak alan, arayüzeydeki maksimum alanla değiştirilir ve serbest-uzay geçirgenliği ϵ_0 , yarıiletken ortamını ifade eden uygun bir geçirgenlik ϵ_s ile yarıiletken ortam özelliğinden değişecek, böylece,

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}}. \quad (2.6)$$

olur.

Bir metal ile bir yarıiletken temas ettiğinde Schottky engelini nasıl oluştuğunu görmek için her ikisinin de elektriksel olarak nötr ve birbirinden ayrı olduğunu varsayalım. Metalin iş fonksiyonundan daha küçük bir iş fonksiyonuna sahip n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı şekil 2.2(a) 'da gösterilmektedir. Yüzey durumlarının hiç bulunmadığını varsayıyoruz. Metal ve yarıiletken bir telle birbirine bağlanırsa yarıiletkendeki elektronlar metale geçer ve her iki Fermi seviyesi şekil 2.2(b) 'de gösterildiği gibi, aynı seviyeye gelmeye zorlanırlar. Her iki katının da yüzeyindeki durgun elektronların enerjileri artık aynı kalmazlar ve aradaki boşlukta sağdan sola doğru bir elektrik alan oluşur. Metalin yüzeyinde yarıiletkenin yüzeyindeki artı yük tarafından dengelenen eksi yük olmalıdır. Yarıiletken n-tipi olduğundan, artı yük, yüzeyden uzaklaşan iletkenlik elektronları tarafından sağlanacaktır, böylece geride elektronlardan arınmış bir bölgede telafi edilmemiş pozitif verici iyonlar kalır. Verici yoğunluğu metaldeki elektronların yoğunluğu bir çok mertebe daha az olduğu için, telafi edilmemiş vericiler, yaklaşık p-n kontağındaki arınma bölgesi büyüklüğünde, w kalınlığında bir katman oluşturur ve yarıiletkendeki bantlar şekil 2.2(b) 'deki gibi yukarı doğru kıvrılırlar [Rhoederick, 1988].



Şekil.2.2 Metal-yarıiletken arasındaki engel yapısı (a) nötr ve ayrılmış, (b) elektrikle bağlantılı, (c) dar aralıkla ayrılmış, (d) en iyi kontak biçimi. Buradaki $\bullet$ iletkenlik bantı elektronları anlamına; $+$ verici iyonlar anlamına gelmektedir.

Metal ve yarıiletkenin yüzeyleri dışındaki elektrostatik potansiyeler arasındaki fark $V_i = \delta E_i$ şeklinde olup, burada δ aradaki mesafe ve E_i aradaki elektriksel alandır. Metal ve yarıiletken birbirine yaklaştığında, E_i sonlu kalıyorsa, V_i sıfıra gitmelidir (şekil 2.2c) ve son olarak birbirlerine dokunduklarında (şekil 2.2d) vakumdan kaynaklanan engel tamamen kaybolur ve geriye ideal bir metal-yarıiletken kontak kalır. V_i 'nin sıfıra gitmesinden açıkça görülmüştür ki Fermi düzeyine göre ölçülen ϕ_B engel yüksekliği [Rhoederick, 1988],

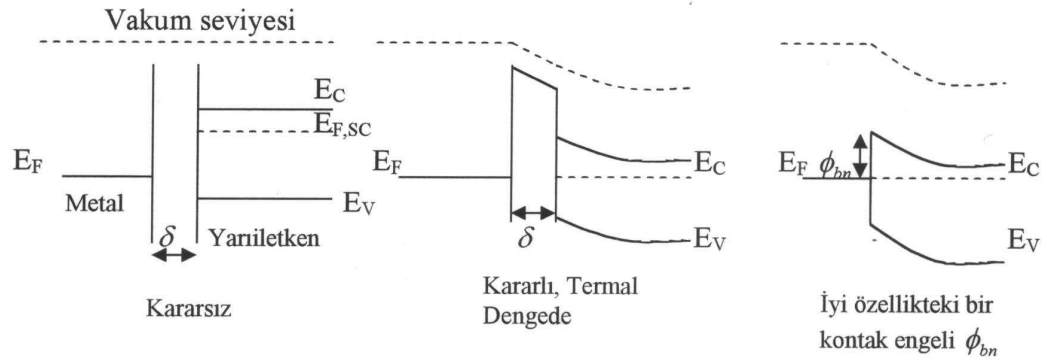
$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Burada yarıiletkenin önemli yüzey parametresi olan elektron etkinliği χ_s değeri; yarıiletken iyonlaşma enerjisi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji farkına eşittir. Yarıiletken iş fonksiyonu ϕ_s değeri; fermi seviyesi ile iyonlaşma enerji seviyesi arasındaki farka eşittir. Burada ξ enerji değeri; iletkenlik bandı ile fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır.

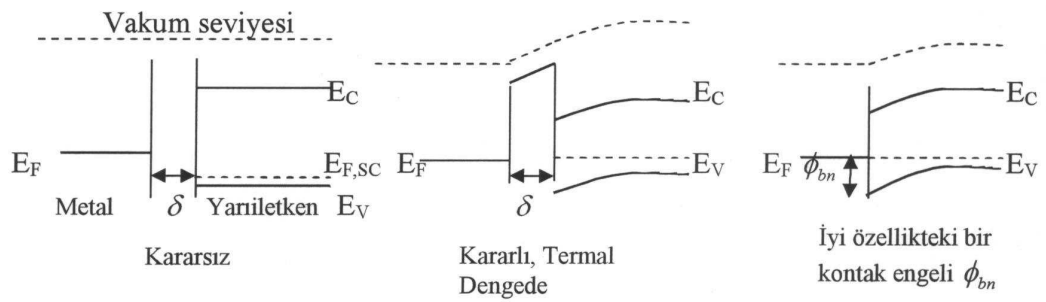
Metal-yarıiletken kontakların oluşturacağı Schottky eklem bant yapılarını; kararsız, kararlı (termal dengede) ve ideal kontak pozisyonlarına göre durumlarını belirten diyagram şekli.2.3 'te gösterilmiştir.

Bir çok metal-yarıiletken kontaklar uygulamalarında şekil 2.2d 'de gösterilen ideal durum elde edilemez, genellikle yarıiletken yüzeyinde yaklaşık 1-2 nm kalınlıklı yalıtkan bir oksit tabaka oluşur. Bu nedenle uygulamadaki olası kontak şekil 2.2c 'de gösterildiği gibidir. Bununla birlikte, oksit tabakasının elektronlara koyduğu engel genellikle çok incedir ve iletkenlik elektronları açısından elektronlar kolayca tünelleme yoluyla geçebilirler. Böylece şekil 2.2(c) ve 2.2(d) hemen hemen aynıdır ve oksit filmdeki V_i çok küçük olduğundan denk. (2.7) iyi bir yaklaşıktır [Rhoederick, 1988].

(a) $\phi_M > \phi_{SC}$ n-tipi yarıiletken: Schottky Engeli,



(b) $\phi_M < \phi_{SC}$ p-tipi yarıiletken: Schottky Engeli,



Şekil.2.3. Metal-yarıiletken kontağı arasındaki bant yapıları ve Schottky engeli oluşumu.

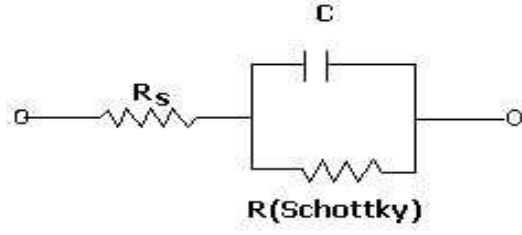
Yukardaki tanımlamalar, n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s 'nin metalin iş fonksiyonu ϕ_m 'den daha küçük olduğu uygulamalar içindir.

2.2. Schottky Diyotlarda İdeallikten Sapmalar

İdeal Schottky diyot yapısının değerlendirilmesinde kullanılan iki metottan biri I-V karakteristiğidir. R_s diyotun seri direnci, I_s doymuş akımı ölçülür ve $n(V)$ beslemeye-bağlı ideallik faktörü hesaplanır.

Schottky diyot devresine ait eşdeğer devre modeli aşağıdaki şekil 2.4 'teki gibidir. R Schottky diyotun kendisine ait direnci, R_s diyotun seri direnci ve C diyotun kapasitansdır.

Schottky engeli arayüzey durumu, taşıyıcı transfer mekanizması ve engel yüksekliği geniş anlanda karakteristiği için I-V ölçümlerinden faydalanılır. Genellikle değişik voltajlara bağlı ve seri direncin bulunması ile karışık diyot parametreleri modellenir.



Şekil.2.4 Schottky diyot eşdeğer devresi

Schottky diyottaki akım yayımı parametreleri için deneysel I-V grafiği değerlendirilerek elde edilen ifade şöyledir;

$$I = I_s [\exp(q(V - IR_s) / nkT) - 1], \quad (2.8)$$

burada I diyot akımı, I_s doymuş akımı, q elektron yükü, V uygulanan besleme voltajı, R_s seri direnç, n ideallik faktörü, k Boltzman sabiti ve T sıcaklık olup diyot gerilimi $3kT/q$ 'den büyük olması durumundaki ifadesi $V - IR$ 'dir.

I_s doymuş akım, yapının karşıdan karşıya taşıyıcı transfer mekanizmasına bağlı bir değerdir. Schottky engelinden termoiyonik yayma için gerekli ifade ise,

$$I_s = AA^*T^2 \exp(-q\phi / kT). \quad (2.9)$$

Burada A kontak alanı, A^* etkin Richardson alanı ve ϕ_{bo} sıfır voltajdaki engel yüksekliğidir.

Sadece ileri besleme altında akım akışı ifadesini basitleştirmek için $(V - IR_s) \geq 3kT / q$ durumunda geniş bir alanda kullanılacak tanımlama şu şekilde ifade edilir,

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s) / nkT). \quad (2.10)$$

İdeallik faktörü ($n=1$) Schottky diyotlarda ilk olarak seri direnci bağlama fikri Norde tarafından ileri atılmıştır [Norde, 1979]. $n>1$ durumunun geçerli olduğu

durumlar için Sato ve Yasumura Schottky diyotun doğru beslemedeki I-V incelemesiyle Norde tarafından ileri sürülen yaklaşımları değiştirerek n , R (Schottky) ve ϕ parametrelerini elde etmişlerdir [Sato and Yasumura, 1985]. Elde ettikleri sonuçlara göre Schottky diyotun iki farklı sıcaklıkta I-V ölçümlerine gerek görülmüştür. Cheung' un çalışmasında ise tek bir I-V ölçümüyle n , R ve ϕ değerleri alternatif bir yaklaşımla hesaplanmıştır [Cheung, 1986].

İdeal diyot akımı modeli denklem (2.9) ve (2.10) aracılığı ile belirlenip, akım akışındaki dahili etkiler olarak görülen sapma nedenleri şöyle sıralanabilir: görünen kuvvet ve alana-neden olan Schottky engel azalması, arayüzey durumları varlığı, üretim-yeniden birleşim akımı, arayüzeyde karşıdan karşıya tünellenmesi, yüksek seviyeli katkılanma ve homojen olmayan uzaysal engeller. Bundan dolayı, bu şartlarda bunu beklemek zor olup, öncelikli istenen durum, gerçek diyotlarda sahip olunan ideallik faktöründe; uygulanan voltaj fonksiyonuna tercih edilmesidir.

2.3. Schottky Diyot Kapasitansı ve Beslemeye Bağımlılığı

Bir metal-yarıiletken kontağı kurulduğunda yarıiletkenin iletkenlik ve değerlik bantları metaldeki Fermi düzeyi ile belli bir enerji bağıntısına ulaşır. Bu bağıntı bilindiğinde, yarıiletkende sınır koşuluna bağlı olarak Poisson denklemi ile çözüme gidilir. Metalin n-tipi ve p-tipi malzemelerle farklı beslemeler altındaki enerji-bant diyagramı şekil 2.5 'te gösteriliyor.

W arınma genişliği olmak üzere, $x < W$ için $\rho \cong qN_d$ ve $\rho \cong 0$ ve $x > W$ için $dV/dx \cong 0$, kesin yaklaşımı altında, metal-yarıiletken engeli için şu ifadeler elde edilir [Sze, 1981]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_d}(V_{bi} - V - \frac{kT}{q})} \quad (2.11)$$

$$|E(x)| = \frac{qN_d}{\epsilon_s}(W - x) = E_m - \frac{qN_d}{\epsilon_s}x \quad (2.12)$$

$$V(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s}(Wx - \frac{1}{2}x^2) - \phi_{Bn} \quad (2.13)$$

burada kT/q terimi, çoğunluk-taşıyıcı dağılımının kuyruğunun (n tipi yarıiletken tarafındaki elektronlar) getirdiği katkıdır. E_m , $x=0$ 'daki maksimum elektrik alan şiddetidir:

$$E_m = E(x=0) = \sqrt{\frac{2qN_d}{\epsilon_s} (V_{bi} - V - \frac{kT}{q})} = \frac{2(V_{bi} - V - kT/q)}{W}. \quad (2.14)$$

Yarıiletkende birim alana başına uzay yükü Q_{sc} ve birim alandaki arınma tabaka kapasitansı C şöyle verilir [Sze, 1981],

$$Q_{sc} = qN_d W = \sqrt{2q\epsilon_s N_d (V_{bi} - V - \frac{kT}{q})} \quad (C/cm^2) \quad (2.15a);$$

$$C \equiv \frac{|\partial Q_{sc}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (F/cm^2). \quad (2.15b);$$

Denklem (2.15b) farklı biçimde de yazılabilir:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V - kT/q)}{q\epsilon_s N_d} \quad (2.16a);$$

veya

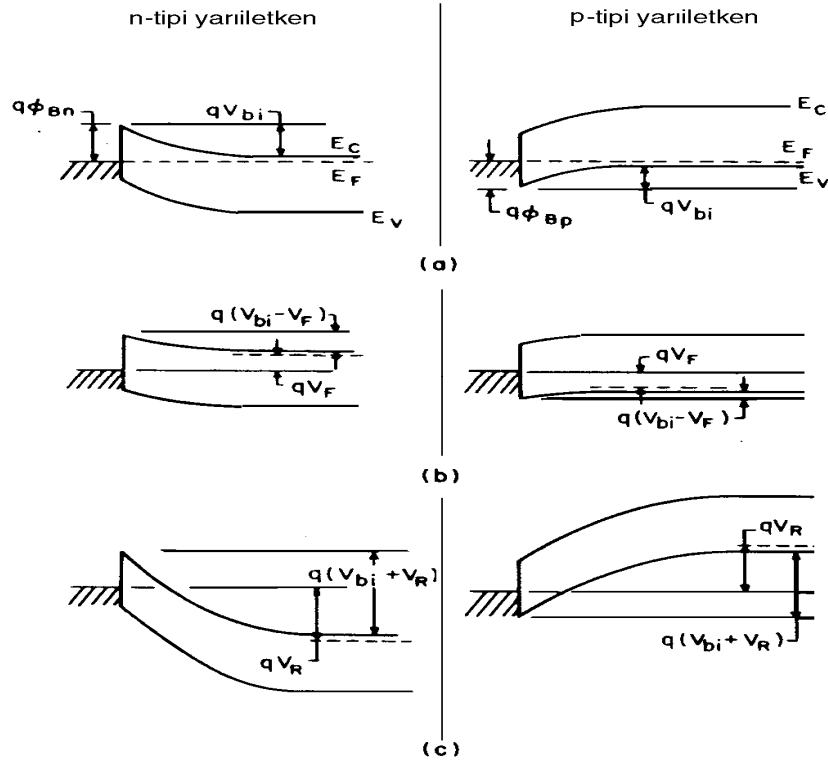
$$-\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s N_d} \quad (2.16b);$$

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[-\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right]. \quad (2.17a)$$

Son ifade, arınma mesafesi derinliğine göre katkı yoğunluğu ifadesidir. Katkı yoğunluğu, Kennedy (1968) tarafından ifade edildiği hali ile:

$$N_D(W) = -C^3 (e\epsilon_r \epsilon_0 A^2)^{-1} (dC/dV)^{-1} \quad (2.17b)$$

şeklindedir.



Şekil.2.5 Farklı beslemeler altında n-tipi ve p-tipi yarıiletken ile metalin enerji-bant çizelgeleri (a) Isısal dengede. (b) İleri beslemede. (c) Geri beslemede.

Böylece uygulanan ters voltaj V 'deki küçük-sinyal kapasitansı C 'nin ölçülmesinden ve C 'in V ile değişme oranının ölçülmesinden, N_D katkılanma yoğunluğu W derinliğine bağlı olarak belirlenebilir; bu W değeri, kapasitans ölçümlerinden bulunur. Derinlik katkı yoğunluğunun bulunması ve denk. (2.17b) ile verilen değerlerin hatalı olmaması için diferansiyel kapasitans ölçümüne bağlı olarak derinlik mesafesi W elde edilir. Derinlik profili $N(x)$ değeri uygun bir şekilde ölçülmesi, C ifadesinden olup, x değeri yorumlanır. $N(x)$, n-tipi malzeme üzerinde ve ana profilinin pozitif sabit uzay-yükü etkinliğinin olmasıyla oluşan pozitif verici iyonlarını gösterir. Böylece denk. (2.17b) 'deki kapasitans ifadesi,

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / x \quad (2.17c)$$

ile verilip, buradan derinlik mesafesi ifadesini,

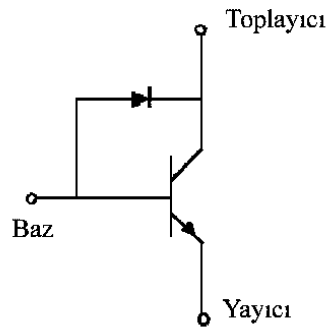
$$x = \epsilon_r \epsilon_0 A / C \quad (2.17d)$$

şeklinde belirlenip, denk. (2.17c) ve (2.17d) değerleri C-V yönteminden hesaplanır.

2.4. Schottky Diyotların Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Schottky-engel diyotun asıl görevleri yüksek-frekans kapasitesi ve zayıf ileri-voltaj değeridir. Bu özellikleri ve kolay üretilmesi, cihaza geniş uygulama alanları sağlamıştır.

1. Genel amaçlı bir doğrultucu olarak, bu amaçla pek çok devre uygulamalarında kullanılmaktadır.
2. Yüksek-frekans kapasitesi sayesinde, tüm doğrultucular arasında Schottky engeli mikrodalga karıştırıcı ve dedektör olarak en uygun kullanılan diyotdur.
3. İleri beslemede düşük kaybı (düşük voltaj düşmesi) sayesinde güç elektroniğinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle düşük-voltajda yüksek akımlı güç kaynaklarında kullanılabilir.
4. Lineer olmayan I-V karakteristikleri nedeniyle, varistör olarak kullanılabilir.
5. Geri besleme altında arınma-tabaka kapasitansı değişimi sayesinde varaktör yerine kullanılabilir.
6. Güneş pili, fotodedektör, metal-tabanlı transistör, MESFET, gibi birçok değişik cihazlar için temel yapı taşıdır.
7. Omik kontağı Schottky eklemenin özel bir hali olarak varsayarsak bu her yarıiletken cihazın diğer cihazlara veya dış çevreye bağlantısı için gereklidir.
8. Bir kenetleyici bipolar transistördeki Schottky diyot, şekil 2.6 'da gösterildiği gibi, taban ve toplayıcı arasına bağlanır. Transistör işleyiş mekanizmasında doyma bölgesinde taban-toplayıcı eklemi ileri besleme altındadır. Bir Schottky diyot paralel bağlandığında, akımın çoğu schottky cihazından geçer ve azınlık taşıyıcı depolanması taban-toplayıcı p-n eklemine ortadan kalkar. Sonuç olarak bipolar tranzistörün kapanma süresi oldukça azalır.



Şekil.2.6 Bir n-p-n bipolar transistöre bağlanmış Schottky diyot kenetleyici

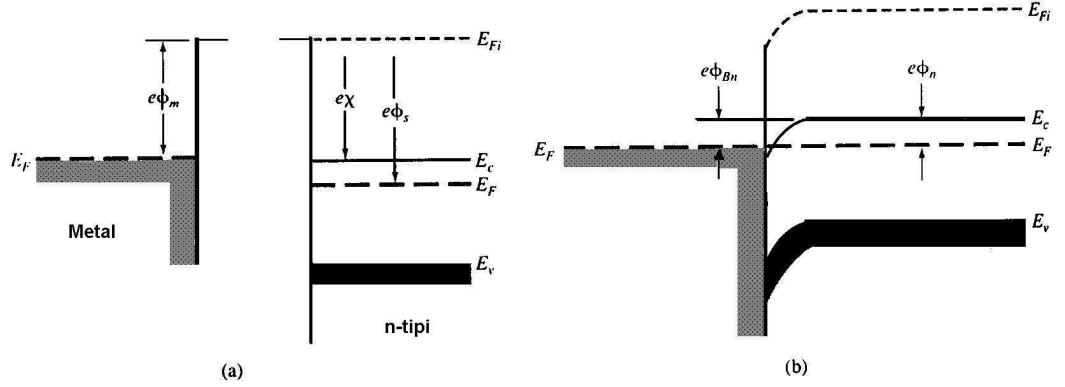
9. Aynı zamanda bütünleşmiş enjeksiyon mantık devreleri ve tranzistör-tranzistör mantık devrelerinde Kenetleyici diyot olarak ta kullanılır.
10. Düşük sıcaklık işlemi nedeniyle, Schottky engeli, başta yüzey özellikleri olmak üzere, yarıiletken malzemenin karakterizasyonunda bir araç olarak kullanılır.

2.5. Omik Kontak

Akım-voltaj karakteristiği lineer olan kontak türüne, omik kontak denir. Metal-yarıiletken kontak türlerinde omik davranışlar da gözlenir. Yarıiletken iş fonksiyonu ϕ_s , metalin iş fonksiyonu ϕ_m 'nin kıyaslamasından omik kontak şöyle belirlenir:

$\phi_m < \phi_s$; metal/n-tipi yarıiletken kontakları,

$\phi_m > \phi_s$; metal/p-tipi yarıiletken kontakları.



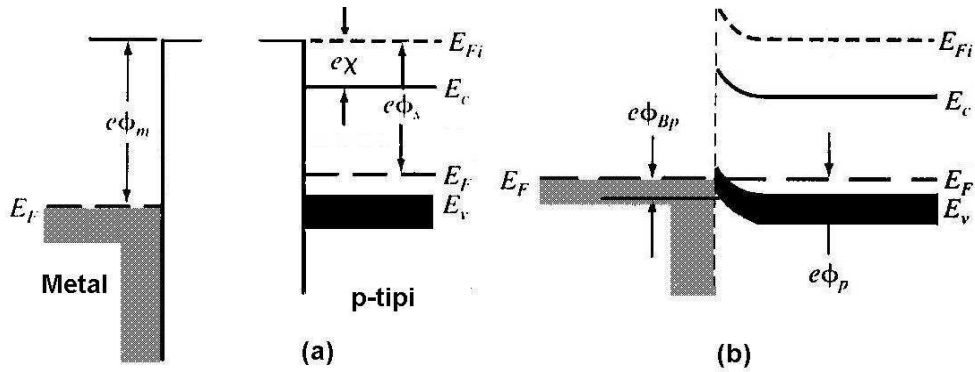
Şekil.2.7. Metal ve n-tipi yarıiletken arasındaki omik kontak gösterimi ($\phi_m < \phi_s$), (a) Kontak öncesi durum, (b) İyi özellikteki kontak durumu.

Metal-yarıiletken kontak oluşumundan önceki ve sonraki enerji bant çizelgesi Şekil.2.7 'de gösterilmektedir. Bu bant çizelgesi bir n-tipi yarıiletken ile metal arasında oluşan kontak biçimidir. Bu da $\phi_m < \phi_s$ olduğu varsayılır. Böylece, metalden yarıiletken içine elektron akışı olur, böylece metalde pozitif yük birikimi olur. Yarıiletken bandındaki bükülme “aşağı doğru” dur ve her iki yönde elektron akışı için engel bulunmamaktadır. Bu akım artışı, aslında, voltaj artışı ile lineerdir ve Ohm yasası gereği olarak orjin üzerinden simetriktir. Bundan dolayı, bu oluşum omik kontak yapısındadır. Benzer olarak bir p-tipi yarıiletken için söz konusu durumu için ilişki $\phi_m > \phi_s$ olarak ifade edilmektedir.

Kontaktaki fermi seviyelerine gelince; yarıiletkenin fermi seviyesi metalin fermi seviyesinden ($\phi_m - \phi_s$) farkı kadar üst taraftadır. Kontak oluşumundan sonra elektronlar yarıiletken bölgesinden metal bölgesine geçerler ve kontağın yarıiletken tarafında pozitif yüzey yükü, metal tarafında ise negatif yüzey yükü oluşur. Bu yük geçişi tamamlandıktan sonra fermi seviyesi ($\phi_m - \phi_s$) kadar azalmaktadır. Omik kontaklarda yük depolanma bölgesi oluşmayıp, sadece kontaktaki yük dağılımları yüzey yüklerinden oluşmaktadır. Bu kontak yapısında taşıyıcıların metalden yarıiletken ve yarıiletkenden metale doğru akışı olmaktadır.

Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa gerilim uygulanması durumunda Şekil.2.8 'de gösterilen durum ortaya çıkmaktadır. Uygulanan potansiyel farkı bütün yarıiletken boyunca dağılmaktadır. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak yapılarında metal yüzeye negatif gerilim uygulanırsa yarıiletkenin iletkenlik bandına metalden elektron akışı olur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise metal yüzeye pozitif gerilim uygulandığında yarıiletkenin değerlik bandına boşluk akışı olur. Bu yapı davranışlarından dolayı omik kontaklar enjeksiyon kontakları olarak da adlandırılır.

Uygulama alanında omik kontağın oluşumu, yüzey yapılarından ve büyütülme durumlarından dolayı bazı güçlükler ile karşılaşılır. Bu yüzden *n*-tipi ve *p*-tipi yarıiletken yüzeyinde kontak oluşumu için buharlaştırılan metal, bu işlem sırasında yarıiletken ile alaşım halini alır. Böylece yarıiletken yüzeylerde metal katkılanmasından ötürü, n^+ veya p^+ katmanları oluşur. Bu tabakalar yarıiletken bölgesine oranla çoğunluk taşıyıcıları bakımından daha etkin olur. Buradaki n^+ ve p^+ bölgelerinde omik kontak davranışı gözlenir.



Şekil.2.8. Metal ve p-tipi yarıiletken arasındaki omik kontak gösterimi ($\phi_m > \phi_s$)
(a) Kontak öncesi durum, (b) İyi özellikteki kontak durumu.

Alüminyum sık sık elektronik cihazlar arasında kontak yapımı için kullanılır. Cihazın yaklaşık $450-550^{\circ}\text{C}$ 'de kısa bir süre tavlınması halinde alüminyum, Si veya SiO_2 'te kolayca bağlanır. Bu tip kontaklar, fiziksel ve mekaniksel etkilere karşı dayanıklıdır. İyi bir omik kontak oluşumu, uygun sıcaklıktaki tavlama ile mümkündür. Alüminyum iş fonksiyonu Si 'den büyük olması nedeniyle p -bölgesindeki kontak omik olur. Alüminyumun silisyuma difüzyonu sık ve oldukça iletken bir p^+ -bölgesi sağlar.

Alüminyum n -tipi silisyum için aynı şekilde kontak malzemesi olarak kullanılır. Bu durumda doğrultucu kontak oluşumunu önlemek için, oldukça katkılı ve sık bir n^+ -tabakası konur. Bu n^+ -tabakası çok iyi iletken olduğundan ve çok ince tabakadan oluştuğundan, tünelleme yoluyla elektron akışı olur.

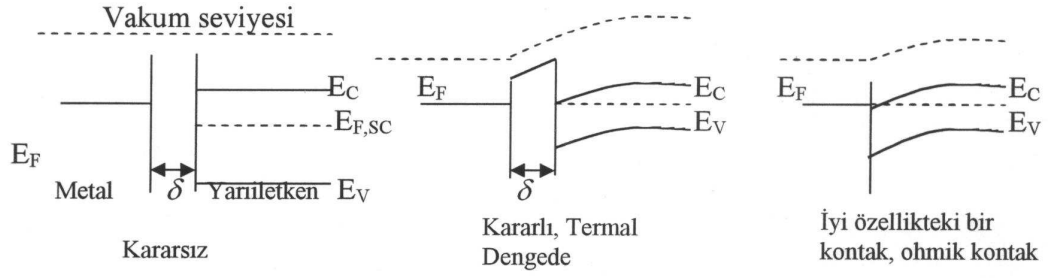
Buradaki ifadelerde geçen ince ($1\ \mu\text{m}$ kalınlığından daha az) alüminyum filmler özellikle büyük-ölçekli elektronik cihazların çip üstünde düzenli bir şekilde yapılmış iç bağlantılarında kullanılır. Burada ince-film yüksek akım yoğunluğuna karşı güçlendirilmeli, aksi halde elektrik devresi zayıf potansiyele uğraması durumunda “elektrontransferi” veya “elektrongeçiş” mekanizması başarısız olur. Burada, hızlandırılmış elektronlar ve metal iyonları arasındaki momentum değiş tokuşu, ince-filmin negatif tarafından pozitif tarafına bazı metal iyonlarını iteler. Sonuç olarak katot yakınında boşluklara neden olur.

Metal-yarıiletken arasında oluşacak eklemleri için omik kontakların oluşumu ve bant yapıları kararsız, kararlı (termal dengede) ve iyi bir kontak pozisyonlarına göre durumlarını şekil 2.9 'da gösterilmektedir.

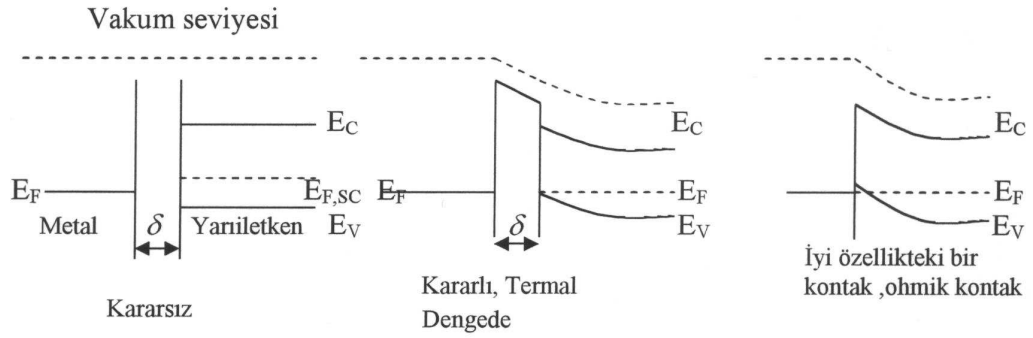
İlk olarak kontak direncinde, akım yoğunluğu ile voltajın yönüne bağlı olarak karşılıklı türevi dikkate alınır. Sıfır beslemede, özel kontak direnci R_C 'nin omik kontaklara ait değeri şöyledir [Chang, Fang and Sze, 1971]:

$$R_C \equiv (\partial J / \partial V)_{V=0}^{-1} \quad (2.18)$$

(a) $\phi_M < \phi_{SC}$ n-tipi yarıiletken: Omik Kontakt,



(b) $\phi_M > \phi_{SC}$ p-tipi yarıiletken: Omik Kontakt,



Şekil.2.9. Metal-yarıiletken kontağı arasındaki bant yapıları ve omik kontak oluşumu.

Metal-yarıiletken kontakların katkılanma yoğunluklarının azalması ile, termoiyonik-yayılma akım taşınmasında baskın olur. Böylece omik kontağın özel kontak direnci,

$$R_C = k / (qA^*T) \cdot \exp(q\phi_{Bn}/kT) \quad (2.19)$$

şeklinde olur. Bu denklemin türetirken, engel yüksekliğinin küçük voltaja bağımlılığı ihmal edildi. Denklem (2.19) bize düşük engel yüksekliğinin küçük R_C 'yi elde etmek için kullanılması gerektiğini ifade ediyor.

Yüksek katkılanmış kontaklar için ise, tunel oluşumu baskın olur ve akım $V \gg kT/q$ için $J \approx J_s \cdot \exp(qV/nkT)$ ile verilir. O zaman kontak direnci,

$$R_C \approx \exp(q\phi_{Bn}/E_{00}) = \exp\left[(2\sqrt{\epsilon_s m^*}/\hbar) \cdot (\phi_{Bn}/\sqrt{N_D})\right]. \quad (2.20)$$

biçiminde olur.

3. METAL-YARIİLETKEN KONTAK TEORİSİ

Schottky-engel kontağı oluşumundaki enerji-band diyagramları Şek. 2.1 'de gösteriliyor. İdeal bir arayüzey için, engel yüksekliği, $\phi_b = \phi_m - \chi_s$ ile verilmekle birlikte deneysel olarak böyle bir bağıntı nadiren tam olarak gerçekleşir. Bu farklılık henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Şu anda, birkaç öneri vardır; bunlar (1) arayüzeydeki yalıtkan bir tabaka, (2) yüzey tuzakları, (3) metalin oluşturduğu aralık durumları ve (4) yapıya bağlı arayüzey kutupları olarak sıralanabilir. Sonuç olarak, engel oluşumu metal iş fonksiyonuna denk.(2.1) 'dekine göre daha zayıfça bağlıdır.

Bazı metallerin n -tipi Si ve GaAs yarıiletkenlerindeki tipik engel yükseklik değerleri Tablo(3.1) 'de listelenmiştir. Bunların p -tipi alttabanlar üzerindeki engel yükseklikleri şöyle ifade edilir;

$$q(\phi_{Bn} + \phi_{Bp}) = E_g \quad (3.1)$$

Bu bağlantıyı deneysel olarak gözlenmektedir.

Tablo 3.1 n -tipi yarıiletkenler üzerine bazı metallerin (eV olarak $q\phi_{Bn}$) 300 K 'de engel yükseklikleri [Milnes, 1980].

Metal	Si	GaAs
Al	0.68-0.74	0.73-0.80
Ag	0.56-0.79	0.88
Cu	0.66-0.79	0.82

Schottky engelinde akım transferi engel üzerinden çoğunluk taşıyıcılarının termoiyonik yayılmasıyla olur ve aşağıdaki gibi ifade edilir, (bakın kısım 3.1.1)

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) [\exp\left(\frac{qV_f}{nkT}\right) - 1] \quad (3.2)$$

burada

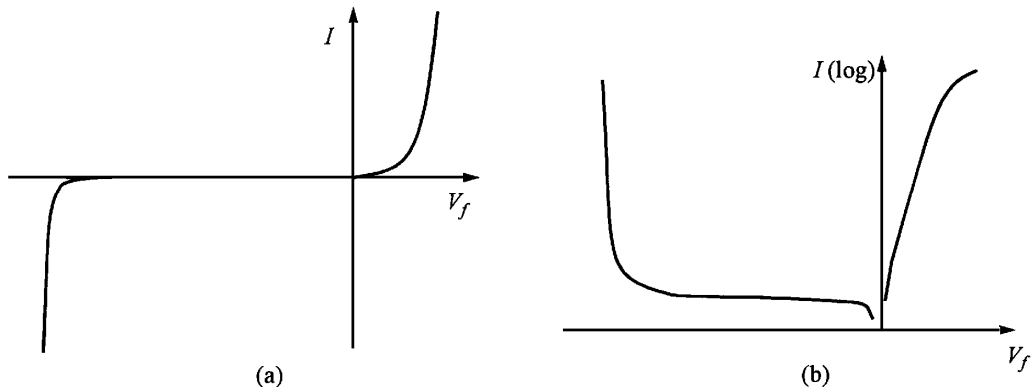
$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.3)$$

dir. Si, Ge ve GaAs için ortak etkin Richardson sabitleri A^* Tablo 3.2 'de gösteriliyor. Denk. (3.2)' deki n değeri (≥ 1) ideallik faktörüdür.

Tablo 3.2. Richardson sabitleri (A^*) Si, Ge ve GaAs için genel kullanılan değerler (A/cm^2-K^2).

	Si	GaAs	Ge
<i>n</i> -tipi	110	4.4	143
<i>p</i> -tipi	30	74	41

$n > 1$ için akla gelen nedenler arayüzeyssel bir tabaka, engel yüksekliğindeki homojensizlik veya voltaja bağlı görüntü-kuvvet azalması olabilir.



Şekil 3.1. Schottky engelinin tipik I-V karakteristiği (a) doğrusal akım grafiği ve (b) logaritmik akım grafiği.

Azınlık taşıyıcının delik akımı, difüzyon ile sınırlıdır ve

$$J_h = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV_f}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

ile verilir.

Bu difüzyon akımı genellikle termoiyonik yayılma akımından 4-6 mertebe daha küçüktür. Minimum azınlık taşıyıcı depolanmış çoğunluk taşıyıcı akımı sayesinde Schottky engeli, *p-n* eklemine ($\approx 1GHz$) kıyasla çok daha yüksek frekanslarda ($\approx 100GHz$) çalışır.

İlave bir başka akım bileşeni, arınma-bölgesi üretim/yeniden birleşim akımıdır:

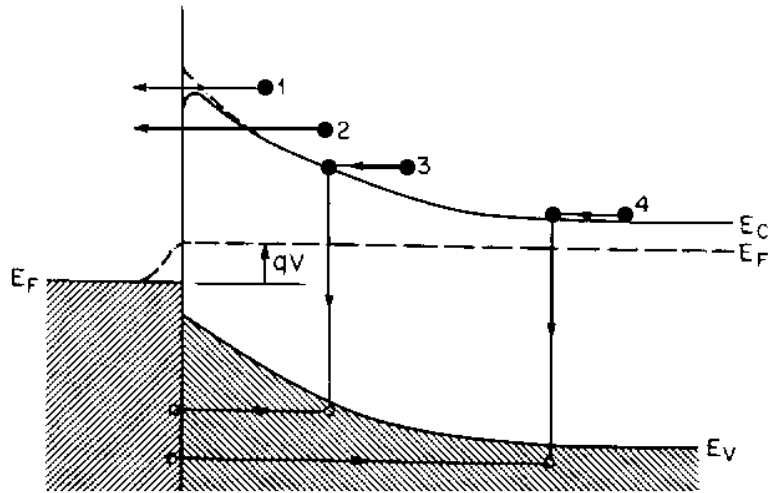
$$J = J_{re} \left[\exp \left(\frac{qV_f}{2kT} \right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

J_{re} 'nin büyüklüğü, yarıiletken malzemenin kalitesine göre değişmektedir. Eğer J_{re} denk. (3.2) 'de karşılık gelen bileşeninden daha büyükse, küçük ileri beslemeli akımda ve ters akım da artacaktır.

Genel I-V karakteristikleri Şekil 3.1' de gösteriliyor. İdeallik faktör n 'in değeri, akımın voltaj ile üstel artışından ölçülebilir. Yüksek ileri beslemede, akım, seri direnç veya yüksek akım injeksiyonu ile bir düzeyde kalır. Yüksek geri beslemede, kırılma meydana gelir [Kwok, 1995].

3.1. Akım Transfer Mekanizması

Metal-yarıiletken kontaklarda akım transferi esasen çoğunluk taşıyıcılardan meydana gelir. Metal-(n-tipi) yarıiletken kontağına ileri besleme uygulandığı zaman elektronların geçişi için dört temel yöntem Şekil 3.2 'de şematik olarak gösterilmiştir. Ters besleme durumunda aksi mekanizmalar meydana gelir [Rhoederick, 1978]. Bu mekanizmaları şöyle sıralayabiliriz:



Şekil 3.2 İleri besleme altında dört temel transfer mekanizması [Rhoederick, 1988].

1). Yarıiletkendeki gelen elektronların potansiyel engelinin üzerinden metale transferi orta düzey katkılı yarıiletkenlerle kurulan (örneğin Si için $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ve yaklaşık oda sıcaklığında çalışan Schottky diotlar için baskın mekanizmadır,

- 2). Elektronların engelden geçerek kuantum-mekaniksel tünellemesi (fazla katkılı yarıiletkenler için önemlidir ve çoğu omik kontakların gerekçesidir),
- 3). Uzay-yük bölgesinde yeniden birleşme mekanizması,
- 4). Metalden yarıiletkenle delik katkılanması.

İlk olarak elektronların potansiyel engeli üzerinden transferi olayını dikkate alacağız. Yüksek-hareketli yarıiletkenler (Si gibi) için transfer, termoiyonik yayılma teorisi ile tanımlanabilir. Bu teori ile birlikte düşük-hareketli yarıiletkenlere uygulanabilen difüzyon teorisini ve bu iki teorinin sentezi olan termoiyonik-difüzyon teorisini inceleyeceğiz.

Engel üzerinden yayılım ele alındığında iki yöntem geçerlidir:

- 1). Elektronların engeli geçmesi için ilk önce yarıiletkenin arayüzüne taşınması gerekir.
- 2). Arayüzüne ulaştıklarında metale yayılmaları, elektronların metal ve yarıiletken sınırı arasındaki transfer oranına bağlıdır.

Bu iki oluşum seri halde gerçekleşir. Temel yapı elektronlar akışına engel olması ile belirlenir. Wagner (1931), Schottky ve Spenke(1939) 'nin difüzyon teorisine göre birinci oluşum sınırlayıcı faktördür. Bethe (1942) 'nin termoiyonik yayılım teorisine göre ise ikinci oluşum daha önemlidir.

3.1.1. Termoiyonik Yayılma Teorisi

Termoiyonik yayılma teorisi şu varsayımlara dayanır [Bethe, 1942]: (1) engel yüksekliği $q\phi_{Bn}$ 'nin kT 'den çok daha büyük olması, (2) ısı dengelinin yayılmayı belirleyen düzlemde kurulması ve (3) net akımın varlığının bu dengeyi etkilememesi. Bu varsayımlardan, engelin şekli önemsizdir ve akım akışı sadece engel yüksekliğine bağlıdır.

Yarıiletkenin metale akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ potansiyel engelini aşacak enerjilere sahip elektronların konsantrasyonuyla verilir. Bunu x doğrultusu için yazarsak,

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (3.6)$$

olur, burada $E_F + q\phi_B$, metal içine termoiyonik yayılma için gerekli minimum enerji ve v_x transfer yönündeki taşıyıcı hızıdır. Artan enerji aralığındaki elektron yoğunluğu şöyledir:

$$dn = N(E)F(E)dE = \frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_C} \exp[-(E - E_C + qV_n)/kT] dE. \quad (3.7)$$

burada $N(E)$ ve $F(E)$, sırasıyla durum yoğunluğu ve dağılım fonksiyonudur, m^* yarıiletkenin etkin kütesidir ve $qV_n = (E_C - E_F)$ 'dir.

Eğer iletkenlik bandındaki elektronların tüm enerjisinin kinetik enerji olduğunu öngörürsek,

$$E - E_C = \frac{1}{2} m^* v^2 \quad (3.8)$$

olur. Burada dE ve $(E - E_C)^{1/2}$ 'yi çekip ve denk.(3.7) 'de yazarsak,

$$dn = 2 \left(\frac{m^*}{h} \right)^3 \exp\left(-\frac{qV_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^* v^2}{2kT}\right) (4\pi v^2 dv). \quad (3.9)$$

olur. Bu denklem tüm yönlerde dağılmış v ve $v+dv$ arasındaki hızlara sahip birim hacimdeki elektronların sayısını verir. Hız bileşenleri, $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ şeklinde dikkate alır ve $4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z$ dönüşümünü kullanırsak, denklem (3.6) ve (3.9) 'dan,

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp(-qV_n / kT) \exp\left(-\frac{m^* v_{0x}^2}{2kT}\right). \quad (3.10)$$

elde ederiz. v_{0x} hızı x yönünde engeli aşmak için gerekli minimum hızıdır ve

$$\frac{1}{2} m^* v_{0x}^2 = q(V_{bi} - V) \quad (3.11)$$

ile verilir. Burada V_{bi} sıfır beslemedeki birikme voltajı (built-in) dır. Bunu denklem (3.10) 'da yazarsak,

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.12)$$

olur. Burada ϕ_B , engel yüksekliğidir ve V_n ile V_{bi} 'nin toplamına eşittir ve ayrıca termoiyonik yayılma için etkin Richardson sabiti,

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.13)$$

ile verilir.

Engel yüksekliği, metalden yarıiletken giden elektronlar için aynı olduğundan yarıiletken akan akım, uygulanan voltajdan etkilenmez. Bu nedenle, termal denge halinde (yani $V=0$ iken) yarıiletkenden metale akan akıma eşdeğer olmalıdır.

Karşılık gelen akım yoğunluğu denk. 3.12 'den $V=0$ olduğunda elde edilir,

$$J_{s \rightarrow m} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.14)$$

Denklem 3.12 ve 3.14' ten toplam akım yoğunluğu şöyle verilir,

$$J_n = J_{ST} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.15)$$

burada

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right). \quad (3.16)$$

olur.

3.1.2. Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisi şu varsayımlara dayanır [Schottky, 1938]: (1) engel yüksekliği kT 'den çok daha büyüktür, (2) arınma tabakasında elektron çarpışmalarının etkisi dikkate alınır, (3) taşıyıcı yoğunlukları $x=0$ ve $x=W$ 'de akımdan etkilenmezler (yani denge değerlerindedirler) ve (4) yarıiletkenin safsızlık yoğunluğu bozulmamıştır.

Arınma bölgesindeki akım yerel alana ve konsantrasyon değişimine bağlı olduğundan, akım yoğunluğu denklemini kullanmalıyız:

$$\begin{aligned} J_x = J_n &= q \left[n(x) \mu \xi + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \\ &= q D_n \left[-\frac{q n(x)}{kT} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial x} \right]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Karalı-durum koşulu altında, akım yoğunluğu x 'ten bağımsız olup ve $\exp[-qV(x)/kT]$ kullanılarak integre edilebilir. Böylece ,

$$J_n \int_0^w \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right] dx = q D_n \left\{ n(x) \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right] \right\}_0^w \quad (3.18)$$

olur ve sınır koşullarımız,

$$qV(0) = -q(V_n + V_{bi}) = -q\phi_{Bn} \quad (3.19a)$$

$$qV(W) = -qV_n - qV \quad (3.19b)$$

$$n(0) = N_C \exp\left[-\frac{E_C(0) - E_F}{kT}\right] = N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.19c)$$

$$n(W) = n = N_C \exp\left(-\frac{qV_n}{kT}\right). \quad (3.19d)$$

dır. Denk.(3.19d) 'yi denk. (3.18) 'de yerine koyarsak,

$$J_n = q N_C D_n \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] / \int_0^w \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right] dx. \quad (3.20)$$

olur. Schottky engelleri için, görüntü-kuvvet etkisi ihmal edilerek, potansiyel dağılımı denk.(2.13) ile verilir veya,

$$qV(x) = \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right) - q\phi_{Bn}. \quad (3.21)$$

Bunu denk. (3.20) 'de yazarsak ve $V_{bi} + V$ cinsinden W 'yi ifade edersek,

$$J_n = \left\{ \frac{q^2 D_n N_C}{kT} \left[\frac{q(V_{bi} - V) 2N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \right\} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$= J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (3.22)$$

elde ederiz. Difüzyon ve termoiyonik yayılma teorilerinin akım yoğunluğu ifadeleri, denk. (3.15) ve (3.22), temel olarak çok benzemektedir. Bununla birlikte, “doyma akım yoğunluğu” J_{SD} , difüzyon teorisinde voltaja daha duyarlı fakat termoiyonik yayılma teorisinin “doyma akım yoğunluğu” J_{ST} ‘ye kıyasla sıcaklığa daha az duyarlıdır.

3.1.3. Termoiyonik Yayılma-Difüzyon Teorisi

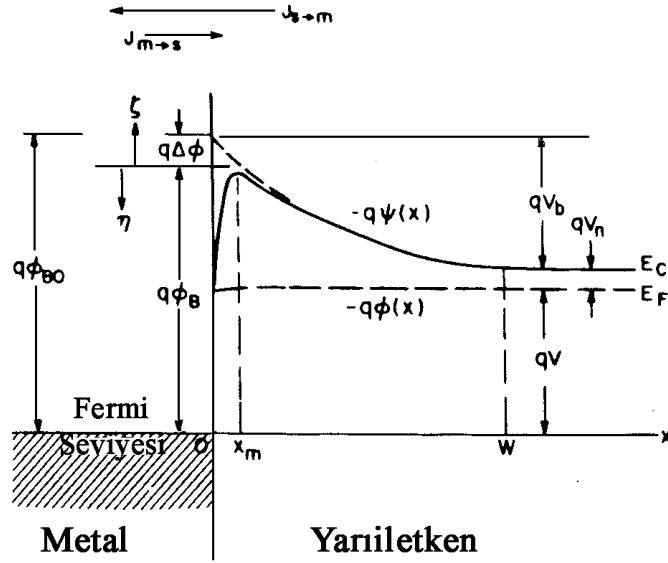
Taşıyıcı difüzyonu, difüzyonun olduğu bölgedeki potansiyel dağılımından kuvvetle etkilendiğinden, bir metal-yarıiletken engel için Şek. 3.3 ‘te gösterildiği gibi mesafeye göre elektron potansiyel enerjisi $q\psi(x)$ ‘in Schottky azaltma etkisini içerdiğini gözönüne alıyoruz. Engel yüksekliği için metal yüzeyi ile $x=W$ arasındaki yük yoğunluğunun (bunlar esasen iyonize vericilerdir) yeterince büyük olduğunu dikkate alıyoruz. Yarıiletken ve metal arasında uygulanan V voltajı metale elektron akmasını sağlar. x_m ve W arasındaki bölgede elektron akım yoğunluğu,

$$J = -q\mu n \frac{d\phi_n}{dx} \quad (3.23)$$

dur. Burada x noktasındaki elektron yoğunluğu N_C , iletkenlik bandındaki durumların etkin yoğunluğu ve T elektron sıcaklığı olmak üzere,

$$n = N_C e^{-q(\phi_n - \psi)/kT} \quad (3.24)$$

dir. x_m ve W arasındaki bölgenin izotermal olduğu ve elektron sıcaklığının örgü sıcaklığına eşit olduğu varsayacağız.



Şekil 3.3. Schottky etkisi enerji-bant çizelgesi birleşimi. Elektron potansiyel enerjisi $q\psi(x)$ ve quasi-fermi seviyesi $q\phi(x)$.

Eğer x_m ve arayüzey ($x=0$) arasındaki engel parçası elektronları emici olarak davranırsa etkin yenidenbirleşme hızı v_R cinsinden akımı maksimum potansiyel enerjide tanımlayabiliriz:

$$J = q(n_m - n_o)v_R \quad (3.25)$$

burada n_m akım varken x_m 'deki elektron yoğunluğudur. n_o ise x_m 'deki sözde-denge elektron yoğunluğudur. Hem ϕ hem de ψ metaldeki Fermi düzeyine göre ölçülebilir. Bu durumda,

$$\phi(W) = -V \quad (3.26a)$$

$$n_o = N_C e^{-q\phi_{Bn}/kT} \quad (3.26b)$$

ve

$$n_m = N_C \exp\left[\frac{-q\phi(x_m) - q\phi_{Bn}}{kT}\right] \quad (3.26c)$$

olur, burada $q\phi_{Bn}$ engel yüksekliğidir.

Eğer denk. (3.23) ve (3.34)' ten n kaldırılırsa ve ϕ ifadesinin doğan x_m ve W integrali alınır,

$$\exp\left[\frac{q\phi(x_m)}{kT}\right] - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = -\frac{J}{\mu N_C kT} \int_{x_m}^W \exp\left(\frac{-q\psi}{kT}\right) dx. \quad (3.27)$$

bulunur ve denk. (3.25), (3.26) ve (3.27) 'den,

$$J = \frac{qN_C v_R}{1 + v_R / v_D} \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{-qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.28)$$

olur, burada

$$v_D \equiv \left[\int_{x_m}^W \frac{q}{kT} \exp\left[-\frac{q}{kT}(\phi_{Bn} + \psi)\right] dx \right]^{-1} \quad (3.29)$$

etkin difüzyon ifadesidir. Yukarıda geçen termal hız,

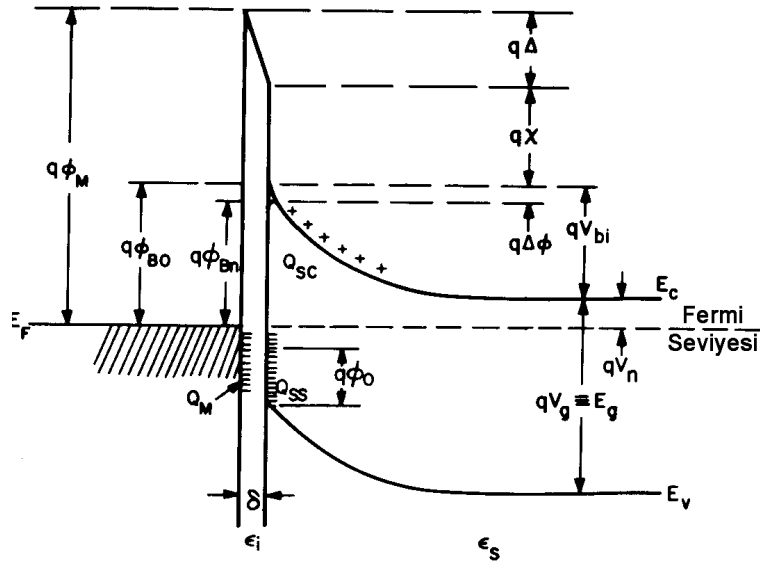
$$\begin{aligned} v_R &= \int_0^\infty v_x \exp\left(-m^* v_x^2 / 2kT\right) dv_x / \int_{-\infty}^\infty \exp\left(-m^* v_x^2 / 2kT\right) dv_x \\ &= (kT / 2m^* \pi)^{1/2} = A^* T^{1/2} / qN_C \end{aligned} \quad (3.30)$$

ile verilir, burada A^* , etkin Richardson sabitidir.

3.2. Engel Yüksekliğinin Hesaplanması

Metal-yarıiletken sistemlerin engel yüksekliği genel olarak hem metal iş fonksiyonunun hem de yüzey durumları tarafında belirlenir. Engel yüksekliğinin genel bir ifadesi şu iki varsayım temel alınarak elde edilebilir [Cowley and Sze, 1965]: (1) metal ve yarıiletken kontak halinde ve aralarında atom mertebesinde arayüzey tabaka var, bu tabaka elektron geçişine engel olmayacak (2) arayüzeyde eV başına birim alanda yüzey durumları yarıiletken yüzeyin bir özelliğidir ve metalden bağımsızdır.

Bir metal n-tipi yarıiletken kontak arasındaki enerji-bant diyagramı Şekil 3.4 'te gösteriliyor. Yüzeydeki enerji düzeyinin $q\phi_0$ değeri ilgi duyulan ilk niceliktir. Metal-yarıiletken kontakta önce Fermi düzeyi ile çakışan enerji düzeyi oluşmuştur.



Şekil 3.4. Metal ile n-tipi yarıiletken kontak arasındaki enerji-bant diyagramı, burada arada atomik boyutta bir arayüzeyse tabaka var. ϕ_M = Metalin iş fonksiyonu, ϕ_{Bn} = Metal-yarıiletken engel yüksekliği, ϕ_{Bo} = Sıfır elektrik alanında ϕ_{Bn} nin asimptotik değeri, ϕ_o = Yüzeydeki enerji düzeyi, $\Delta\phi$ = Engel azaltıcı görüntü-kuvveti, Δ = Arayüzeyse tabakadaki potansiyel, χ = Yarıiletken elektron etkinliği, V_{bi} = Birikme potansiyeli, ϵ_s = Yarıiletken dielektriği, ϵ_i = Arayüzeyse tabaka dielektriği, δ = Arayüzeyse tabakanın kalınlığı, Q_{SC} = Yarıiletken uzay-yük yoğunluğu, Q_{SS} = Yarıiletkenin yüzey-durum yoğunluğu, Q_M = Metalin yüzey-yük yoğunluğu.

İkinci nicelik $q\phi_{Bn}$, metal-yarıiletken kantağın engel yüksekliğidir; metalden yarıiletkene akan elektronların bu engeli aşmalıdır. Bu arayüzeyse tabakanın birkaç angstrom kalınlığında olduğu varsayılacaktır ve böylece elektronlar için gerçekte saydam olacaktır.

3.2.1 Akım-Voltaj Ölçümü

Yüksek mobiliteli yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotlar, ileri besleme çok büyük olmamak koşuluyla, termoiyonik yayılma teorisiyle verilen J/V karakteristiğini taşırlar. Bu teoriye göre,

$$J = J_o \{ \exp(qV/kT) - 1 \} \quad (3.31)$$

burada J akım yoğunluğudur (birim alandaki akım) ve

$$J_o = A^* T^2 \exp \{ -q(\phi_b - \Delta\phi_{bi}) / kT \}. \quad (3.32)$$

Kolay olsun diye, $\phi_b - \Delta\phi_{bi}$ ifadesi etkin engel yüksekliği ϕ_e olarak alacağız. A^* Richardson sabiti yarıiletkendeki elektronların etkin kütesini, bu elektronların kuantum-mekaniksel yansımaları ve metalin yüzeyi ve engelin tepesi arasındaki elektronların fonon saçılmasını içermektedir.

Akım yoğunluğu değeri sıfır beslemedeki doymuş akım için tahmin edilen J_0 değeri ile engel yüksekliği elde edilecek denklem,

$$\phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^* T^2}{J_0} \right) \quad (3.36)$$

olur. Burada hesaplanacak ϕ_{Bn} değeri seçilen A^* için çok hassas değildir, oda sıcaklığı için, A^* 'nın %100 artmasıyla sadece ϕ_{Bn} 'nın 0.018 V kadar artmasına neden olacaktır.

Diyotlar, uygulamalarda ideal denklem (3.31) 'i tam olarak hiç sağlamazlar, fakat daha uygun olarak biraz değiştirilen bir denklemle tanımlanabilirler.

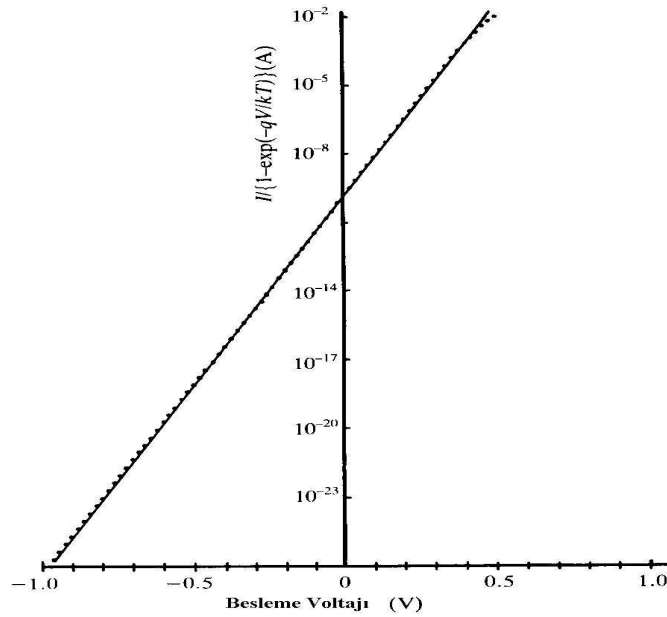
$$J = J_0 \exp(qV / nkT) \{1 - \exp(-qV / kT)\} \quad (3.37)$$

burada ideallik faktörü n ifadesi,

$$n \equiv \frac{q}{kT} \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \quad (3.38)$$

olur. Burada n (sıcaklığa bağlı olabilir) yaklaşık olarak V 'den bağımsız ve bir 'den büyüktür. n 'in bir 'i geçmesinin pek çok olası nedeni vardır. Genel olanı ϕ_b ve $\Delta\phi_{bi}$ 'nin beslemeye bağlı olmasıdır. V 'nin $3kT/q$ 'den büyük değerleri için denk.(3.32) 'yi tekrar yazarsak,

$$J = J_0 \exp(qV / nkT) \quad (3.39)$$



Şekil 3.5. Al-GaAs diyot için logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ 'nin karşı V 'ye karşı grafiği [Missous and Rhoderick, 1986].

böylece ileri yönde $\ln J$ 'nin V 'ye karşı grafiği $V < 3kT/q$ bölgesi dışında, düz bir çizgi vermesi gerekir. Uygulamalarda akım yoğunluğu J 'den ziyade toplam akım I 'nın ölçülmesi tercih edilir ve J 'nin belirlenmesi A alanının doğru ölçülmesini gerektirir. Denk.(3.32) 'nin bu alandaki avantajı bütün verilen V değerlerinde $\ln[I/\{1-\exp(-qV/kT)\}]$ 'nin V 'ye karşı grafiğinin, sadece $V < 3kT/q$ bölgesi için değil, negatif (geri) değerler için doğru bir çizgi vermesi gerektiğidir. Şekil 3.5 'de GaAs üzerine alüminyumun büyütilmesiyle hazırlanmış bir diyot örneği için böyle bir grafik verilmiştir. Bu diyot ideale çok yakındır. -1 'den +0.5 V aralığında lineerdir ve n değeri 1.01 'dir. Burada I_0 çok hassas belirlenebilir.

Engel yüksekliklerinin I/V karakteristiklerinden belirlenmesi ancak akım termoiyonik yayılma akımı ile belirlenirse güvenilir olacaktır.

3.2.2. Kapasitans-Voltaj Ölçümü

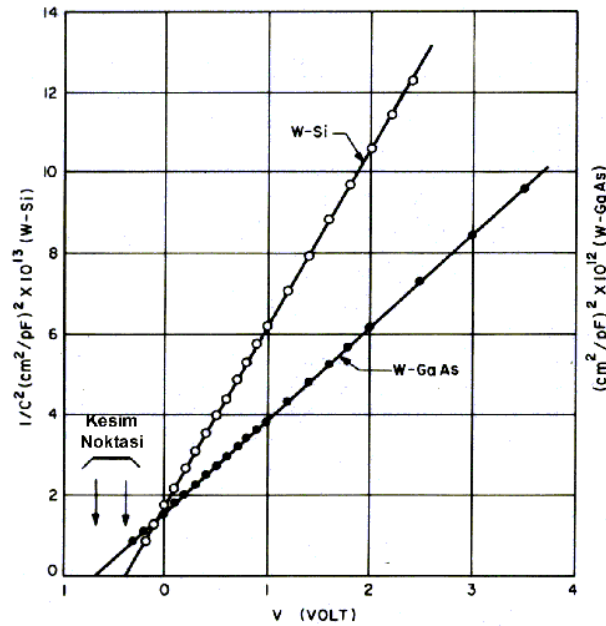
Engel yüksekliği kapasitans ölçümü ile de belirlenebilir. Küçük bir ac gerilimi dc üzerine bindirildiği zaman, bir çeşit yük metal yüzeyinde diğer zıt yük ise yarıiletkende oluşur. C ve V arasındaki ilişki $C \equiv |\partial Q_{sc}|/\partial V = \epsilon_s/W$ denklemi ile verilir. Uygulanan voltaja karşılık gelen $1/C^2$ tipik sonuçları şekil 3.6 'da çizilmiştir.

Voltaj eksenindeki kesişmeden engel yüksekliği belirlenebilir [Crowell and Sarace, 1965]:

$$\phi_{Bn} = V_i + V_n + kT/q - \Delta\phi \quad (3.40)$$

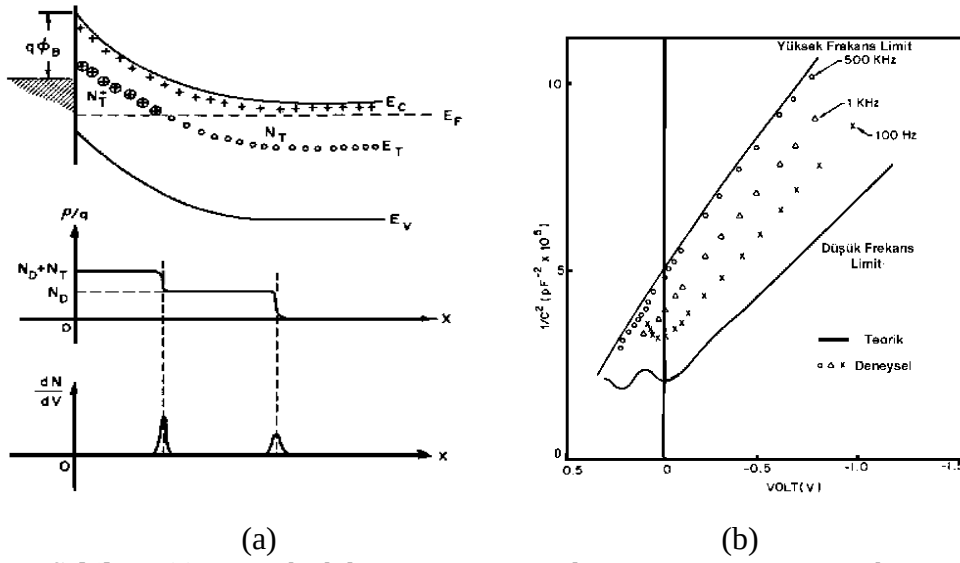
V_i gerilimi kestiği yer ve V_n iletkenlik bandı altındaki Fermi seviyesi derinliğidir, bu katkılanma yoğunluğu biliniyorsa hesaplanabilir. Verici yoğunluğu (N_D) eğimden hesaplanabilir (denk.2.17a/b). (Bu metot ayrıca çok katlı tabakalar içindeki çeşitli katkılanmaları ölçmek için de kullanılır.)

C-V ölçümü derin safsızlık seviyelerini incelemek için kullanılır. Şekil 3.7a yüzey katkılanma seviyesi ve derin verici seviyesine ait bir yarıiletkeni göstermektedir. Besleme durumunda, Fermi seviyesinin üzerindeki tüm vericiler iyonize olacak ve arayüzey yanında daha yüksek katkılanma yoğunluğunu verecektir.



Şekil 3.6 W-Si ve W-GaAs diyot için $1/C^2$ karşı uygulanan voltaj [Crowell, Sarace and Sze, 1965]

Dc beslemesi üzerine küçük *ac* sinyali gönderildiğinde ve derin seviye, sinyali takip edebildiğinde, kapasitansa ilave bir dN/dV katkısı olacaktır.



Şekil 3.7 (a).Yüzey katkılanma seviyesi ve derin verici seviyesine ait bir yarıiletkeni göstermektedir. N_D ve N_T yüzey verici ve derinlik verici yoğunluğunu ifade ediyor, b) $1/C^2$ 'nin farklı frekanslarda V 'ye karşılık gelen değerlerini göstermektedir [Roberts and Crowell, 1973].

Şekil 3.7b $1/C^2$ 'nin değişik frekanslarda V 'ye karşılık gelen değerlerini göstermektedir. Düşük frekans eğrileri derin safsızlık özelliklerini ortaya çıkarabilir. Bir yüzey seviyesi ve derinlik seviyesi safsızlığı olan yarıiletkenin engel yüksekliğini elde etmek için C - V ölçümlerini (Şekil 3.7a) iki farklı sıcaklık için ölçülmesi gerekir [Beguwalla and Crowel, 1974].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalar, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü Kuantum Elektronik Laboratuvarında yapılmıştır. Yapılan işlemler Şekil 4.1 'de basamaklar halinde gösterilmektedir. İşlem aşamaları üzerinde kısaca durulacaktır.

1.)p ve n-Si (100) örnek	2.)Kesme İşemi	3.)Kimyasal Temizleme	4.) Ohmik Eklem (Alttaban Al)
	5.) Fırınlama	450 °C' de 15 dk N ₂	
	6.) Kaplama	Cu ve Ag termal buharlaştıma	
	7.) SCHOTTKY EKLEM		

Şekil 4.1. Metal(omik)–Yarıiletken–Metal(doğrultucu) eklemlerin hazırlanması işlemi aşamaları.

4.1. *p* ve *n*-tipi Si Alttabakaların Özellikleri

Schottky eklemlerin hazırlanmasında kullanılan *n* ve *p*-tipi Si wafer kristal doğrultusu (100) olup bir yüzü parlak diğer yüzü mattır. Si örneklerin özellikleri tablo 4.1 'de verilmiştir. Si kristali dolaylı bant geçişli bir yapıya sahiptir.

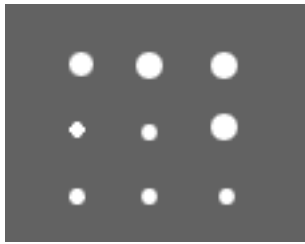
Tablo 4.1. Schottky eklemden kullanılan Si kristalinin özellikleri

Özellikleri	<i>p</i> -tipi	<i>n</i> -tipi
Kristal	Si	Si
Katkı Yoğunluğu	$\sim 0.5-1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$\sim 4-7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
Doğrultusu	(100)	(100)
Özdirenci	5-10 $\Omega\text{-cm}$	6.5-10.5 $\Omega\text{-cm}$
Katkılanan	<i>p</i> -Bor	<i>n</i> ⁻

4.2. Maskelerin Hazırlanması

Schottky kontakları hazırlamak için çeşitli teknikler kullanarak maskeler hazırlanabilir. Bunlar optik ve fiziksel yöntemler olabilir. Burada maskeleri mekanik yöntemle hazırlandı.

Vakumlu ortamda metalleri buharlaştırarak yapılan eklemeler için mekanik yöntemle hazırlanmış metal (fosfobronz) maskeler kullanıldı. Bu maskeler defalarca kullanılabilir. Bu maskelerdeki deliklerin hassasiyeti, işlemin yapılmasındaki inceliğe ve beceriye bağlıdır. Ayrıca maskenin tornada ve CNC tezgahında yapılması işleme bir incelik katıp, daha düzgün maske hazırlanabilir ve böylelikle eklem alanı hesaplaması daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Maskelerimizi matkap ile değişik çaplı kalemler kullanarak hazırladık. Fosfobronz plakalar üzerine aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi 1mm ve 2mm çaplarında dokuz adet eklem için delik elde edildi. Böylece her silisyum üzerinde bir çok kontak iki ayrı çapta elde edildi.



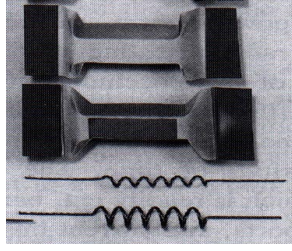
Şekil.4.2. Metalik(fosfobronz) maske.

Mekanik delme yöntemi ile üzerinde toplam dokuz adet ve daire şeklinde 1 ve 2 mm' lik delikler bulunan maskeler şekil 4.2' te görüldüğü gibi hazırlandı. Bu maskeler artık istenilen ebatta kontak almaya hazır hal almış oldu. Termal buharlaştırma sistemi ile bakır ve gümüş kaplama yapıldı.

4.3. Alttabanların Kesim ve Kimyasal Temizlemesi

Kullanılan *n*-tipi ve *p*-tipi Si örnekler üzerinde oluşacak olan oksit tabakayı kaldırmak için öncelikle kimyasal yöntemler ile temizlenir. Çalışılan oda ortamının temiz olma şartları sağlanmalıdır. Bu işlem çeker-ocak altında yapıлып, HF* (hidroflorik asit) çözeltisinde Si örneklerin arka ve ön yüzeyleri kulak temizleme pamuklarıyla hafifçe bastırılarak temizlenir. Bundan sonra numuneleri deiyonize su ile yıkanır. Tekrar ultrasonik banyoda deiyonize su ile 10-15 dakika süreyle yıkanır. Sonrasında metanol ve aseton ile temizlenip kurutulur. Böylelikle numune yüzeyi yağlardan ve kirlilikten en iyi şekilde arındırılıp işleme hazır hale gelir. Ortamda fazla bekletilmeden hemen vakum odasına yerleştirilip işlemlere başlanır. Dolayısıyla yüzeyin hava ile teması sonucunda oksitlenme ve yağlanma riski doğar. Bunun sonucunda hazırlanan eklemelerde istenmedik sonuçlar ortaya çıkabilir.

*HF çok tehlikeli bir asit olduğu için özellikle çalışmalarda dikkat edilmelidir. İşlem esnasında HF 'ye dayanıklı önlük ve eldiven giyilmeli, yüz ve özellikle gözler korunmalı, çeker-ocak çalışır durumda ve ön kapağı kapalı tutulmalıdır. Kesinlikle buharı solunmamalıdır.



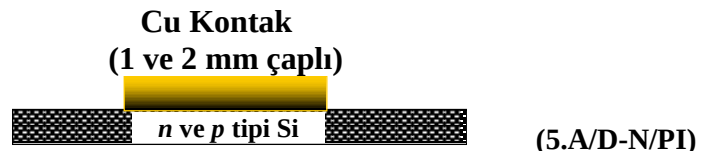
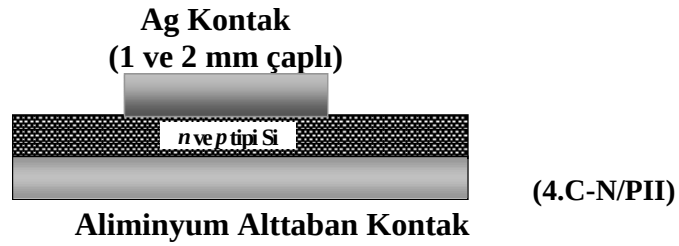
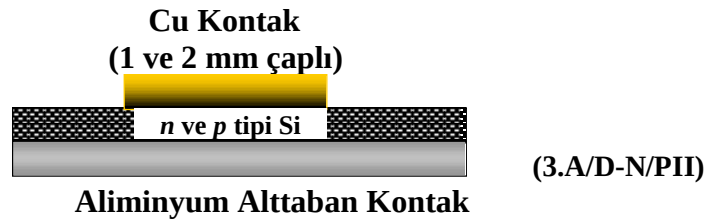
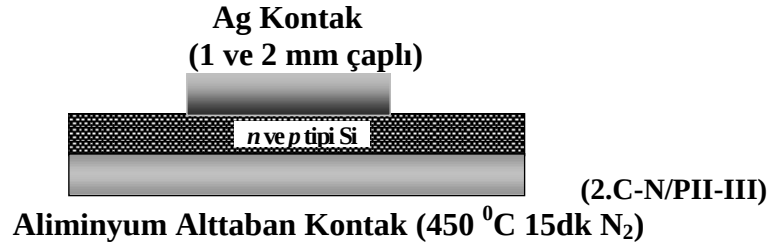
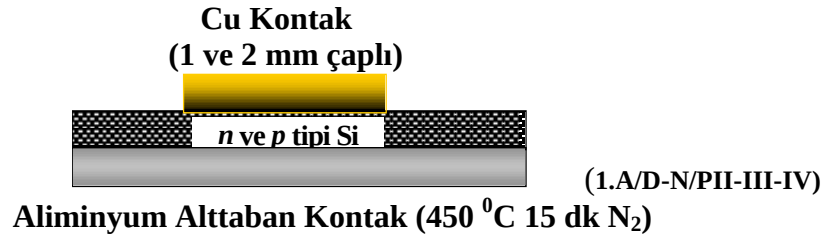
Şekil 4.4. Kaynak malzemeyi buharlaştırmada kullanılan tungsten bot ve tel sarım.

Burdaki ısıyı elektrik akımını tel sarım veya bottan geçirilmesiyle elde edilir. Buharlaştırılacak malzemenin sıcaklığı ısıtılan bot veya telden geçirilen akımı ayarlarak kontrol edilir. Böylelikle buharlaşma hızı kontrol edilir. Bu yöntem basit ve ucuzdur. Bu tekniğin bir de avantajı, tüm kaynak malzeme ve onu içeren pota veya tel sarım kaynak malzemeyi buharlaştırmada gereken sıcaklığa uniform olarak ısıtılmalıdır. Elde edilecek maksimum sıcaklık sınırlıdır ve katılanma hızı çabucak değiştirilemez.

Tablo.4.2. Malzemelerin buharlaşma karakteristiği (buharlaşma basıncı 10^{-4} torr)

Malzeme	Min. Buharlaşma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Buharlaşma Durumu
Alüminyum	1010	Tümü Buharlaşır
Bakır	1017	Tümü Buharlaşır
Gümüş	497	Tümü Buharlaşır
Silisyum	1337	Tümü Buharlaşır

Yüksek vakum ortamı kritik bir konu olup ısıtılan malzeme katıdan gaz hale çok daha düşük sıcaklıklarda geçiş yapar. Katı cisimde yüzey atomlarının bağlı bulunduğu atmosfer basıncı 10^4 mertebesinde. Bu yüzey enerjisinin 1nm ' lik bölgeye uygulanan basınç olarak algılanırsa birimi N/m^2 olacak. Dolayısıyla vakumlu ortam buharlaştırma işlemini kolaylaştırır. Sonuçta çok daha yüksek olan kaynama noktasından ziyade kaynak malzemenin erime noktasına yakın veya daha aşağıda buharlaştırma gerçekleştirilir. Tablo 4.2 'de kullandığımız malzemelerin vakum altında minimum buharlaşma ve ne ölçüde buharlaşma olacağı durumunu göstermektedir. İlave olarak yüksek vakum şartları uçucu malzemelerin hava ile reaksiyonu önler. Bu örneğin oksijenin neden olabileceği oksit gibi istenmeyen bir malzeme katılanan filmde taşıyabilir. Bu durumları ortadan kaldırmak için 10^{-6} mbar gibi yüksek vakumu, mekanik ve turbomoleküler pompa yardımıyla elde edilir.



Şekil.4.5 Hazırlanan Metal(Omik)-Yarıiletken-Metal(doğrultucu) kontak çeşitleri.

Şekil 4.5 'te gösterilen örneklerin tanımlanması için tablo 4.3 'te gösterildiği gibi kataloglanmıştır. Bu şekilde katalogladığımız örneklerin, grafiklerde nasıl bir diyot olduğunu anlamamızda bize kolaylık sağlaması için hazırlanmıştır.

Tablo 4.3. Örneklerin hazırlanma şekillerine göre kataloglanması.

Üst Kontak Malzeme Serisi	Si Tipi (N ve P)	Alttaban Al Kontak (II)	Alttaban Al Kontak (III)	Alttaban Kontak (I)	Çapı: 1-2 mm
A (Cu)	<i>n</i> ve <i>p</i>	Var	Tavlanmış	Yok	1 ve 2
D (Cu)	<i>n</i> ve <i>p</i>	Var	Tavlanmış	Yok	1 ve 2
C (Ag)	<i>n</i> ve <i>p</i>	Var	Tavlanmış	Yok	1 ve 2

Schotkyy eklem çalışması için şekil 4.5 ‘te görüldüğü gibi çeşitli örnekler hazırlandı. Bu örnekler; alttaban tavlanmış Al kontak, tavlanmamış Al kontak ve kontaksız *n* ve *p*-tipi Si üzerine 1-2 mm çaplarında Ag ve Cu kontakları olmak üzere hazırlanmıştır. Al kontak oluşturulması durumunda, termal buharlaştıma vakum ortamı $6,5.10^{-6}$ mbar ve sensordan okunan kalınlık 5.700 kÅ ‘dur. Termal buharlaştırma işlemi ile oluşturulması durumlarına göre A, C, D serileri:

1. **A Serisi** : Ortamın vakumu $8,0.10^{-6}$ mbar, kalınlık 1.200 kÅ ve Cu,
2. **C Serisi** : Ortamın vakumu $3,3.10^{-6}$ mbar, kalınlık 0.200 kÅ ve Ag,
3. **D Serisi** : Ortamın vakumu $7,8.10^{-6}$ mbar, kalınlık 0.480 kÅ ve Cu

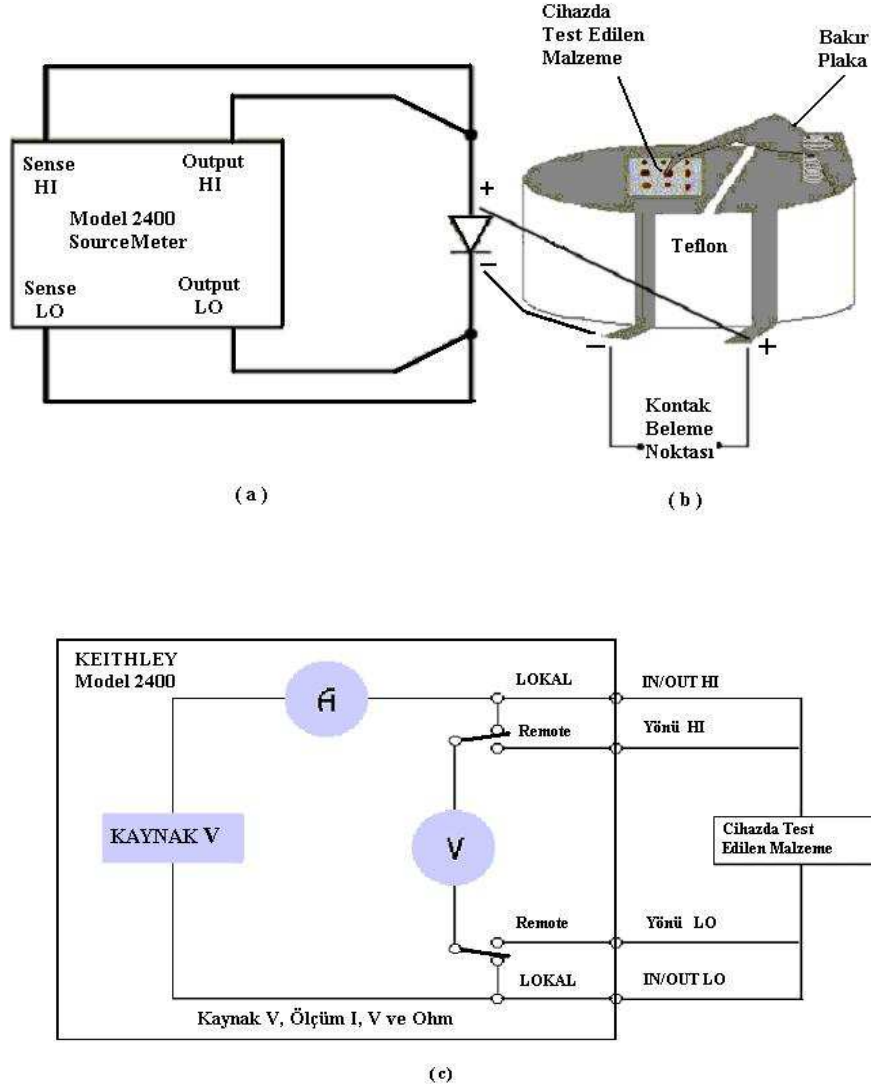
kontak türüne ait olduğunu tanımlamaktadır. Bunlar elde edilen grafikler üzerinde A, C, D olarak gösterilmiştir.

4.5. I-V Ölçüm Düzenegi

Hazırlanmış olduğumuz Schottky eklemlerinin “metal-yarıiletken-metal/metal-yarıiletken-metal/metal-yarıiletken” akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri şekil 4.6 ‘da gösterildiği gibi bir düzenekte ölçüm alınmıştır. Burda voltaj kaynağı ve akım ölçer cihazı KEITHLEY Model 2400 SourceMeter ve GPIB veri transfer kartı ve bilgisayar program kontrolü ile *I-V* ölçümleri alınmış ve verileri kaydedilmiştir. Veri transferi paralel haberleşmede daha hızlı olduğundan IEEE 488 ara kabloların cihazları bilgisayara lineer konfigürasyonu ile bağlanmıştır.

Burda ileri, geri besleme ve ± 2 voltluk besleme aralıklarında tarama yapılarak akım-voltaj ölçümleri alınmıştır. Burdaki farkedilir değişimleri gözlemledik. Bu *I-V* ölçümleri eklemlerin yapıları hakkında bize bilgi verir. Akımın değişimi bize doğrultucu etki gösterip göstermediği ve eklem oluşmasındaki amaca uygunluğu hakkında bilgi verir. Schottky eklem, ohmik eklem veya bunların arasında bir durum

I - V değişiminin daha hassas olması için yarılogaritmik pozisyonlarına bakılarak elektriksel değerlendirme yapılır.

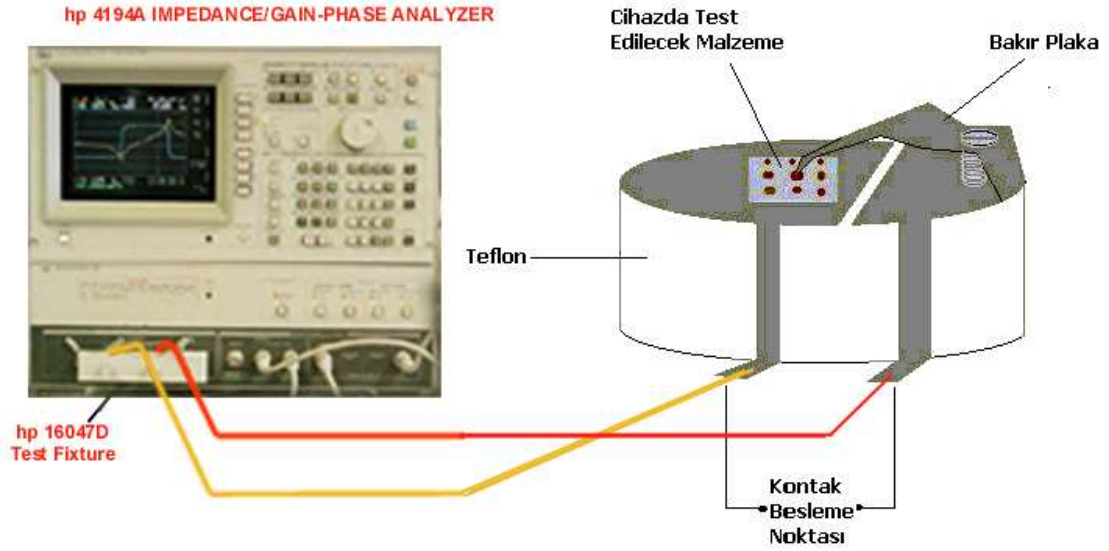


Şekil 4.6. Akım-Voltaj ölçüm düzeneği (a), cihazda test edilecek örnek tutucu kısmı (b) ve KEITHLEY Model 2400 Kaynak Ölçüm sistemi çalışma prensibi (c).

4.6. C-V Ölçüm Düzeneği

Hazırlanmış olduğumuz Schottky eklemlerinin “metal-yarıiletken-metal/ metal-yarıiletken-metal/ metal-yarıiletken” kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri şekil 4.7 ‘de gösterildiği gibi bir düzenekte ölçüm alınmıştır. C-V ölçümünde HP 4194A İmpedance/Gain-Phase Analyzer cihazı kullanılmıştır.

Bu cihazdan GPIB veri transfer kartı ve bilgisayar program kontrolü ile $C-V$ ölçümleri alınmış ve verileri kaydedilmiştir. Cihaz kendi iç besleme, 100Hz 'den 40MHz frekans aralığında ve paralel kapasitans ölçme özelliğine sahiptir. Burada $dc \pm 5$ Volt 'luk besleme altındaki ölçümler 100kHz ve 1MHz frekanslarında olmuştur.

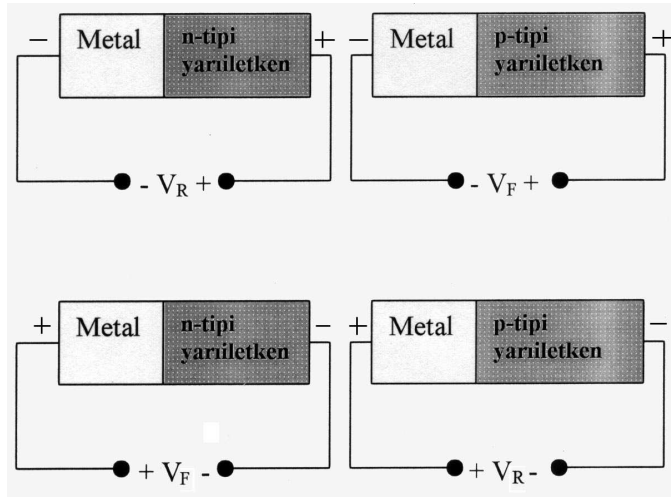


Şekil 4.7. Kapasitans-Voltaj ölçüm düzeneği ve cihazda test edilecek örnek tutucu kısmı.

Düşük frekans (100kHz gibi) ölçümleri geniş çaplı waferların ölçümleri için gerekir. Çünkü ince ve geniş çaplı waferlar yüksek frekansta yüksek seri direnç etkisi gösterirler. Ölçüm frekanslarında cihaz 1MHz yukarısı ve test frekans aralığında $C-V$ ölçümleri doğruluğu artar. Yarıiletken cihaz yapılarını ve hazırlama yöntemlerini değerlendirmede genellikle katkı profili $C-V$ verileri kullanarak yapılmaktadır.

5. SCHOTTKY-ENGEL DİYOT KARAKTERİSTİĞİ

Schottky eklemine besleme uygulanmadığında metalden yarıiletken, yarı iletken den metale eşit ve zıt yönlü akım geçişi termiyonik yayma etkisinden kaynaklanır. Eklemlerde metal kısmında potansiyel engel yüksekliği, Schottky etkisi dikkate alınmadığı zaman uygulanan beslemeden bağımsız ve değişmez. Besleme durumlarına göre yarıiletken tarafındaki potansiyel engel yüksekliği ve dolayısıyla arınma tabakası değişir. İleri besleme durumunda yarıiletken tarafında potansiyel engel yüksekliği ve arınma tabakası küçülür. Metal *p*-tipi yarıiletken eklemlerde akıma katkı boşluklar sağladığından dolayı, yarıiletken den metale doğru boşluk akışı iletme katkı sağlar. Geri besleme durumunda potansiyel engel ve arınma tabakası artar. Bundan ötürü metal/ *p*-tipi yarıiletken eklemlerde boşluk akışında zayıflama olur. İletimi zorlayıcı etkisinden dolayı elektriksel değerlendirmede ileri besleme tercih edilir. Eklem türlerinde ileri (V_F) ve geri (V_R) besleme için bağlanma durumları şekil 5.1 'deki gibi olur.



Şekil 5.1. Metal/yarıiletken eklemleri besleme pozisyonları.

Metal/ *n*-tipi yarıiletken eklemlerde besleme durumunda akıma katkı elektronlar sağladığından yarıiletkenin iletkenlik bandı eğilen bant üzerinden metale elektron akışı; ileri besleme durumunda potansiyel engel ve arınma tabakası azalmasından dolayı kolay ve geri besleme durumunda potansiyel engel ve arınma tabakası artışından dolayı zorlanma olur. Daha önce ifade edildiği gibi eklemlerin Schottky, Omik veya bunların arası bir durumunda olması parametrelerini şöyle sıralanabilir;

- a.) Seçilen yarıiletken cinsi; elektron affinitesi (etkinliği) ve iş fonksiyonu,
- b.) seçilen metal cinsi; iş fonksiyonu, kristal yapısına göre de seçilebilir,
- c.) eklem hazırlama yöntemi,
- d.) eklem tavlama işlemi,
- e.) kimyasal temizlik ve beklenmedik durumlar,

eklemin yapısında oluşacak etkenlerdir. Eklemlerin elektriksel olarak I-V ve C-V grafiklerine bakılarak değerlendirilir.

5.1. Teorik Hesaplamalar

Si ‘un katkı yoğunluğu şekil 5.2 ‘deki grafikten özdirencine karşılık gelen değeri okunarak belirlenmiştir. Bu grafikten bilinen özdirenç değerine karşılık gelen katkılanma yoğunluğu değeri bulunabilir.

$$\rho = \frac{1}{N(x)\mu_p e} \text{ denkleminde malzemelerin özdirenci biliniyorsa, } N(x) \text{ katkı}$$

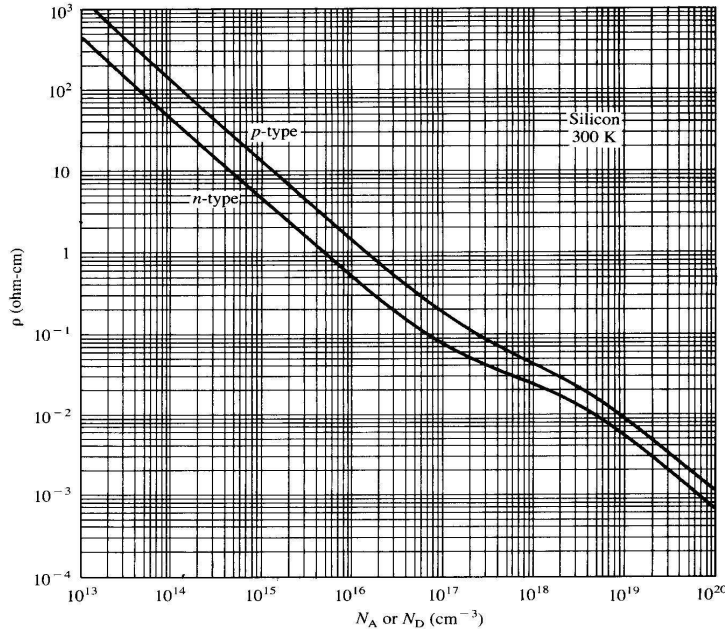
yoğunluğu hesaplanabilir ve şekil 5.2 ‘den okunan değer ile karşılaştırılabilir. Tablo 5.1 ‘de Si için verilmiş bazı sabitleri aşağıdaki işlemlerde kullanacağız.

Tablo 5.1 Si ‘a özgü sabitler (300 K).

Özellikler	Sembol	Si
Yasak Enerji Aralığı	$E_g \text{ (eV)}$	1.12
İletkenlik bandı durum yoğunluğu	$N_c \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	2.82×10^{19}
Valans bandı durum yoğunluğu	$N_v \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	1.83×10^{19}
Elektron Hareketliliği	$\mu_n \text{ (cm}^2 \text{ / V - s)}$	1360
Delik Hareketliliği	$\mu_p \text{ (cm}^2 \text{ / V - s)}$	460
Elektron Etkinliği	$\chi \text{ (V)}$	4.05
Richardson Sabiti (A / cm²-K²)	p-tipi A^*	32
	n-tipi A^*	112

1.) *p*-tipi Si için teorik olarak katkı yoğunluğu ve fermi seviyeleri hesaplanıp, şekil 5.2 grafiğinden okunan değerler ile karşılaştırılır. Si, *n* ve *p*-tipi için teorik hesaplamada

tablo 4.1 'de verilen parametreleri kullanacağız. Hesaplamalardaki denklemler ise aşağıda gösterilen şekilde olup;



Şekil 5.2. Silisyumun öz direncine karşı katkı yoğunluğu, 300K.

$$\rho = 1/(N_A \mu_p e) \quad \text{ise} \quad N_A = 1/(\rho \mu_p e) \quad \text{ve} \quad N_A = N_V \exp\left(-\frac{E_{F,S}}{kT}\right), \quad \text{den}$$

$E_{F,S} = -0,0259 \cdot \ln\left(\frac{N_A}{N_V}\right)$ denklemlerinden taşıyıcı yoğunluğunu ve fermi seviyesini hesaplayalım,

$$\rho = 5 \Omega - cm \quad \text{için} \quad N_A = 1/(5.460.1,602.10^{-19}) = 2,71.10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_{F,S} = -0,0259 \cdot \ln\left(\frac{2,71.10^{15}}{1,83.10^{19}}\right) = 0,23 \text{ eV}$$

$$\rho = 10 \Omega - cm \quad \text{için} \quad N_A = 1/(10.460.1,602.10^{-19}) = 1,35.10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$E_{F,S} = -0,0259 \cdot \ln\left(\frac{1,35.10^{15}}{1,83.10^{19}}\right) = 0,26 \text{ eV}$$

değerleri bulunur.

Silisyum yasak enerji aralığı 1.12 eV ve elektron etkinliği $\chi_s = 4.05 \text{ eV}$ olup, p-tipi Si için iş fonksiyonu hesaplırsak,

$$\phi_s^p = E_g + \chi_s - E_{F,S} = 1,12 + 4,05 - 0,23 = 4,94 \text{ eV}$$

$$\phi_S^p = E_g + \chi_s - E_{F,S} = 1,12 + 4,05 - 0,26 = 4,91 \text{ eV}$$

Metal ile yarıiletken arasındaki eklemlerde oluşacak engel yükseklikleri ise,

a.) Cu için; iş fonksiyonu $\phi_M = 4.65 \text{ eV}$ ise, “Built-in” voltajı:

$$V_{bi} = \phi_S^p - \phi_M = 4.94 - 4.65 = 0.29 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \phi_S^p - \phi_M = 4.91 - 4.65 = 0.26 \text{ eV}$$

burdan engel yüksekliğini $\phi_{Bp} = V_{bi} + E_{F,S}$;

$$\phi_{Bp} = 0.29 + 0.23 = 0.52 \text{ eV}$$

$$\phi_{Bp} = 0.26 + 0.26 = 0.52 \text{ eV}$$

b.) Ag için; iş fonksiyonu $\phi_M = 4.50 \text{ eV}$ ise, “Built-in” voltajı:

$$V_{bi} = \phi_S^p - \phi_M = 4.94 - 4.50 = 0.44 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \phi_S^p - \phi_M = 4.91 - 4.50 = 0.41 \text{ eV}$$

burdan engel yüksekliğini $\phi_{Bp} = V_{bi} + E_{F,S}$;

$$\phi_{Bp} = 0.44 + 0.23 = 0.67 \text{ eV}$$

$$\phi_{Bp} = 0.41 + 0.26 = 0.67 \text{ eV}$$

2.) n-tipi Si ile metal eklemler için,

Fermi seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki potansiyel enerji farkı ;

$\phi_n = (kT / e) \cdot \ln(N_C / N_D)$ denkleminde hesaplırsak,

$$\rho = 6,5 \Omega - cm \text{ için } N_D = 1 / (6,5 \cdot 1360 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) = 7,07 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_n = 0,0259 \cdot \ln\left(\frac{2,82 \cdot 10^{19}}{7,07 \cdot 10^{14}}\right) = 0,27 \text{ eV}$$

$$\rho = 10,5 \Omega - cm \text{ için } N_D = 1 / (10,5 \cdot 1360 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}) = 4,37 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$\phi_n = 0,0259 \cdot \ln\left(\frac{2,82 \cdot 10^{19}}{4,37 \cdot 10^{14}}\right) = 0,29 \text{ eV}$$

Silisyum elektron etkinliği $\chi_s = 4.05 \text{ eV}$ olup, n-tipi Si için iş fonksiyonu hesaplırsak,

$$\phi_S^n = \chi_s + \phi_n = 4.05 + 0.27 = 4.32 \text{ eV}$$

$$\phi_S^n = \chi_s + \phi_n = 4.05 + 0.29 = 4.34 \text{ eV}$$

a.) Cu için; iş fonksiyonu $\phi_M = 4.65 \text{ eV}$ ve ideal Schottky engel yüksekliği;

$$\phi_{Bn} = \phi_M - \chi_s \text{ ise, } \phi_{Bn} = 4.65 - 4.05 = 0.60 \text{ eV}$$

olup, “built-in” voltaj değerleri,

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n = 0.60 - 0.27 = 0.33 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n = 0.60 - 0.29 = 0.31 \text{ eV}$$

b.) Ag için; iş fonksiyonu $\phi_M = 4.50 \text{ eV}$ ve ideal Schottky engel yüksekliği;

$$\phi_{Bn} = \phi_M - \chi_S \text{ ise, } \phi_{Bn} = 4.50 - 4.05 = 0.45 \text{ eV}$$

olup, “built-in” voltaj değerleri,

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n = 0.45 - 0.27 = 0.18 \text{ eV}$$

$$V_{bi} = \phi_{Bn} - \phi_n = 0.45 - 0.29 = 0.16 \text{ eV}$$

şeklinde bulunur. n -tipi ve p -tipi Si için grafikten okunan katkı yoğunluğu değerleri kullanıp, teorik olarak; “built-in” voltajı, Fermi seviyesi ve engel yükseklikleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu sonuçları deneysel değerler ile karşılaştıracamız.

5.2. I-V Karakteristiği ve Grafikleri

I - V incelenmesinden engel yüksekliği hesaplanması ve elektriksel değerlendirmeler hakkında bilgi kısım 3.2.1 ‘de açıklanmıştır. Yapmış olduğumuz ölçümler için bilgi bu kısımda verelim. Schottky eklem diyotlarda arayüzey tabaka varlığından akıma yaptığı etki, cihazın ileri besleme durumunda termiyonik yayma akımı şöyle ifade edilir.

$$I = I_0 \cdot \exp(qV / nkT) [1 - \exp(-qV / kT)] \quad (5.1)$$

buradaki I_0 doymuş akım ise,

$$I_0 = AA^* T^2 \cdot \exp(-q\phi_{Bo} / kT) \quad (5.2)$$

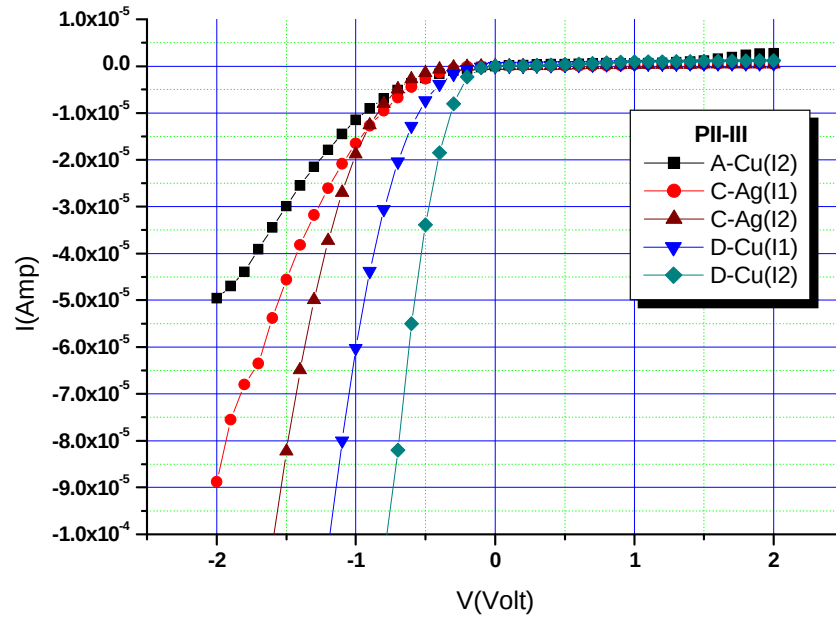
olur.

Schottky eklem, ileri ve geri besleme pozisyonunda I - V ölçümü alınır. Bu ölçümlerde elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Daha sonra bu grafikler yardımıyla oluşan eklem türünü değerlendirebiliriz. Grafik verileri bilgisayar programları ile desteklenip potansiyel engel yükseklikleri her eklem için hesaplandı. Bu hesaplama için $\ln(I)$ - V grafikleri çizilir. Bu grafiklerden daha hassas sonuçlar $\ln(I/(1 - \exp(-eV/kT)))$ - V çizimleri verir. Eklemlere ait I - V grafikleri şekil 5.3/4/5/6/7/8 ‘de verilmiştir.

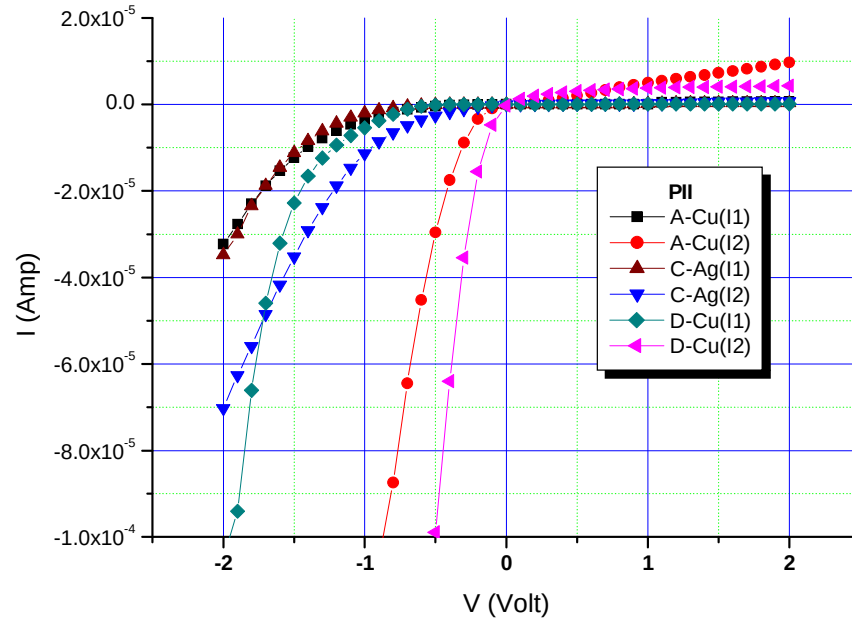
Tablo 4.4 ‘teki katalog ifadelerine göre grafiklerin üzerlerinde tanımlamalar vardır. Katalogladığımız numune için tanımlama, örnek olarak:

P II-III : *p*-tipi Si – Alttaban Al – Tavlanmış,

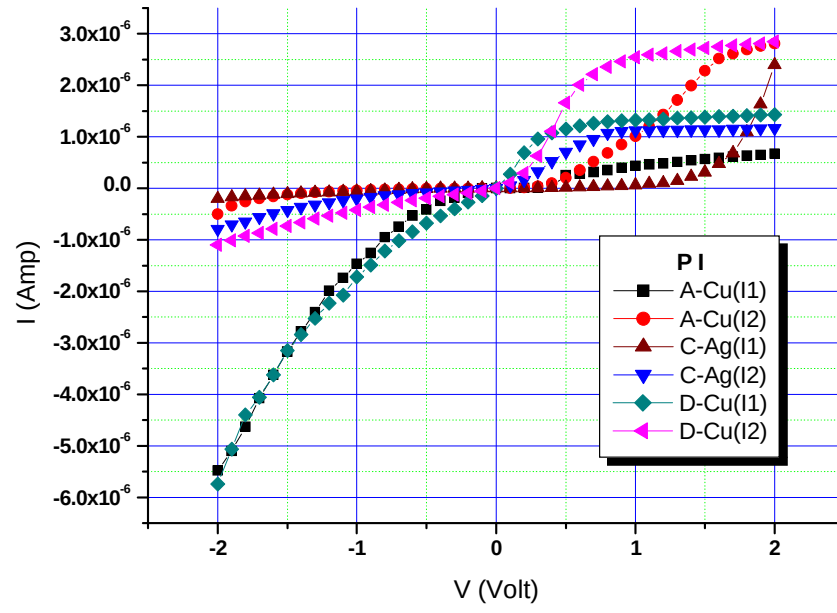
A-Cu(I2) : Yapılan İşlemin Serisini- Schottky Kontak Malzemesi (Okunan Akımın Kontak Çapı), şeklindedir



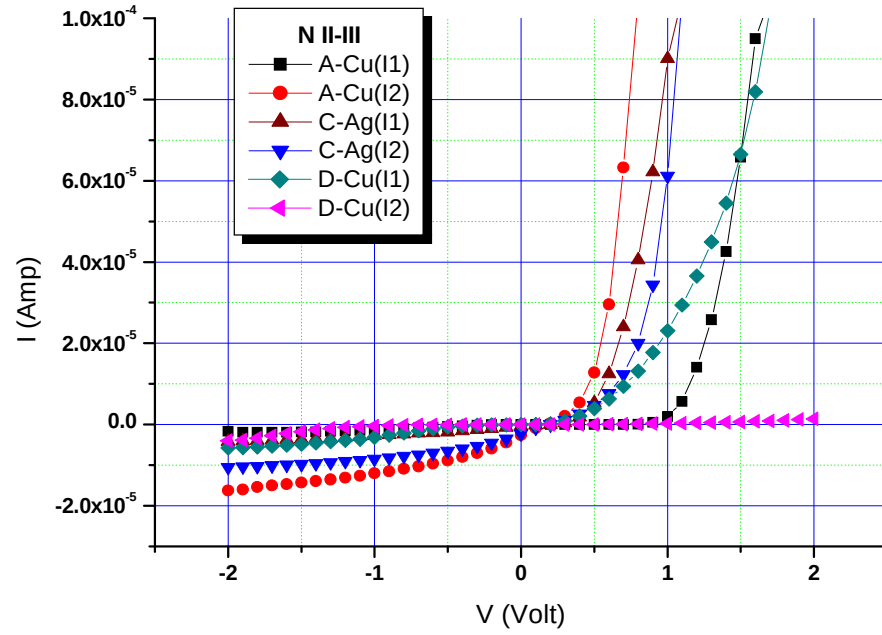
Şekil 5.3. Metal (Al 450 °C 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu veya Ag eklemi *I*-*V* grafiği.



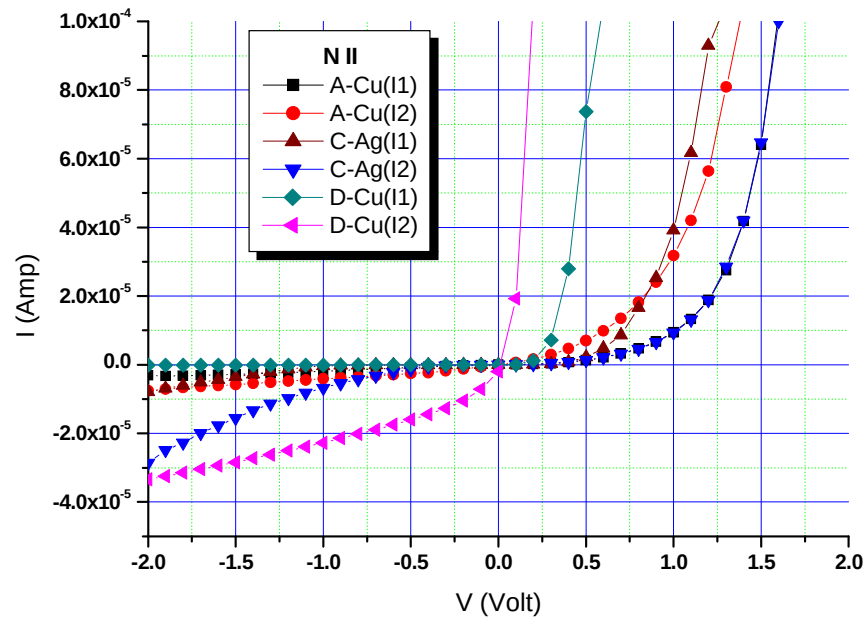
Şekil 5.4 . Metal/ *p*-tipi Si/ Cu veya Ag eklemi *I*-*V* grafiği.



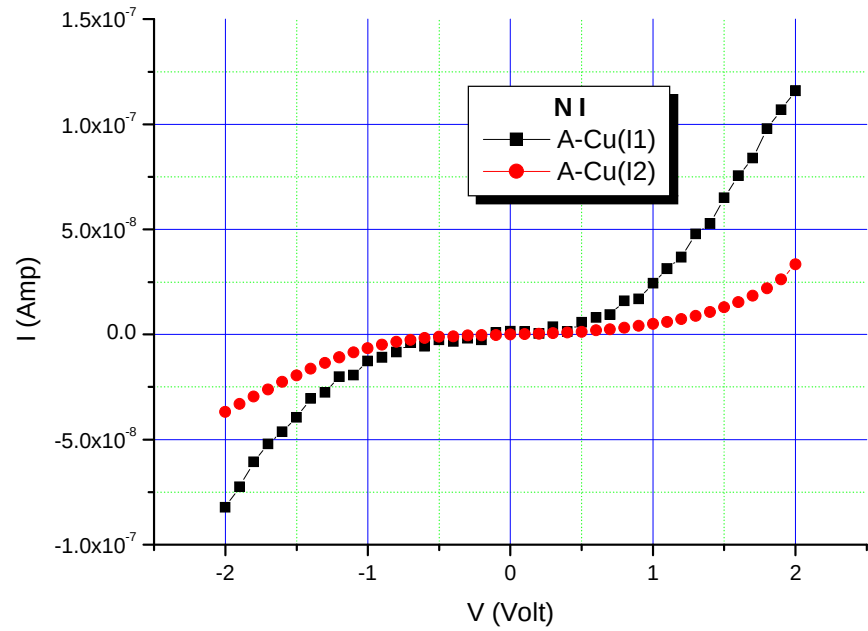
Şekil 5.5 *p*-tipi Si/ Cu veya Ag eklemi *I*-*V* grafiği.



Şekil 5.6. Metal (Al 450 °C 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu veya Ag eklemi *I*-*V* grafiği.



Şekil 5.7. Metal/ *n*-tipi Si/ Cu veya Ag eklemine ait *I*-*V* grafiği.



Şekil 5.8. *n*-tipi Si/ Cu eklemi *I*-*V* grafiği.

Şekil 5.3-5.4 ve 5.5 'te *p*-tipi Si alttabanlar kullanılmıştır. Şekil 5.3 'te görüldüğü gibi alttabanı Al kaplanarak tavlanmış olup, üst yüzeyi hem Ag hem Cu kontaklar ideale yakın Schottky diyot özelliği göstermiştir. Ancak eski kaplama olan A-Cu(I2)

'de aynı özelliklere sahip D-Cu(I2) 'ye göre ileri besleme kısmında sızıntı akımı daha yüksektir. Bunun, Cu kontak üzerinde oluşan oksit tabakasının etkisi olduğu tahmin edilmektedir. Aynı özellikteki Cu kontakların Al alttabanlı, ancak tavlama yapılmamış durumlarında daha yüksek sızıntı akımına neden oldukları şekil 5.4 'te görülmektedir [A-Cu(I2) ve D-Cu(I2)]. Al alttaban kaplanmayan üçüncü set örnekler ise şekil 5.5 'te verildiği gibi Schottky diyot özelliğinden daha fazla saptığı gözlenmiştir. Yine bu şekillerde 1mm çaplı kontakların 2mm çaplı olanlardan daha iyi özellik sergiledikleri gözlenmektedir.

Şekil 5.6-5.7 ve 5.8 'de *n*-tipi Si alttabanlar kullanılmış çalışmalar verilmektedir. Şekil 5.6 'daki D-Cu(I2) 'nin kontak probleminden kaynaklanan rezistiv özellik gösterdiği ve benzeri A-Cu(I2) 'nin oksitlenmeden kaynaklandığı sanılan sızıntısı yüksek Schottky kontak özelliği gösterdiği düşünülmektedir.

p-tipi Si için Al alttaban kaplamasının yapılması daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca Cu 'nun Ag 'den daha iyi Schottky özelliği gösterdiği görülmektedir. Şekil 5.6 'da en iyi özelliği A-Cu(I1) gösterirken, Şekil 5.7 'de en iyi özelliği D-Cu(I1) göstermektedir.

Alttabanın Al kaplamasız olması, *n*-tipinde olduğu gibi, *p*-tipi için de Schottky özelliği bozan, omik özelliğe yaklaşan sonuçlar vermiştir. Tüm *I-V* grafikleri alttabanın Al kaplanması, ancak tavlama yapılmasının illa gerekmediği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Ancak küçük çaplı kontakların (1mm) daha başarılı olduğu ve Cu 'nun Si için biraz daha iyi bir Schottky kontak sağladığı bu grafiklerden söylenebilir.

5.3. C-V Karakteristiği ve Grafikleri

Eklemlerde C-V ölçümleri ile; alıcı ve verici yoğunlukları hakkında bilgi edinilir. C-V grafiğindeki kapasitif değişim katkı yoğunluğu hakkında bilgi verir. Schottky eklemlerin pratikte, kontağın ters kutuplanması ve küçük dV osilasyonları beklenen durumdur. Eğer tuzaklar meydana gelmiyorsa, W boşaltım bölgesi kenarı dW genişliğinde dQ değişimi ile serbest taşıyıcı yoğunluğu değişimi birbirini karşılar. Eğer tuzaklar meydana geliyorsa, bu kısımda dQ yükü içerir. Bunlardan kurtulmanın yolu, yüksek frekansta (>100 kHz) ölçümler yapmak gerek. Bu frekans sadece yarıiletkenin arınma tabakası bölgesindeki yük değişimlerini kapsar. Ortaya çıkan bir diğer problem: seri direnç katkısı, ki buda düşük frekanslarda ortadan kalkar.

Diferansiyel kapasitans ölçümleri ile birlikte, yarıiletkenin homojen iletkenlik durumunun tespiti anlamına gelen safsızlık atomları dağılımı, denklem (3.5) 'ten sağlanır. C-V ölçümleri ile elde edilen kapasitif değişim grafiğinin eğimi diferansiyel kapasitans olup, buradan da yarıiletkenin katkı yoğunluğu bulunur. Safsızlık atomları dağılımı aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanır,

$$N(x) = \frac{-C^3}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2} [dC/dV]^{-1} \quad (3.5)$$

ve bu kapasitif etkinin derinliğe göre değişiminin denklemi,

$$x_d(x) = \frac{\epsilon_0\epsilon_r A}{C} \quad (3.6)$$

ile hesaplanır.

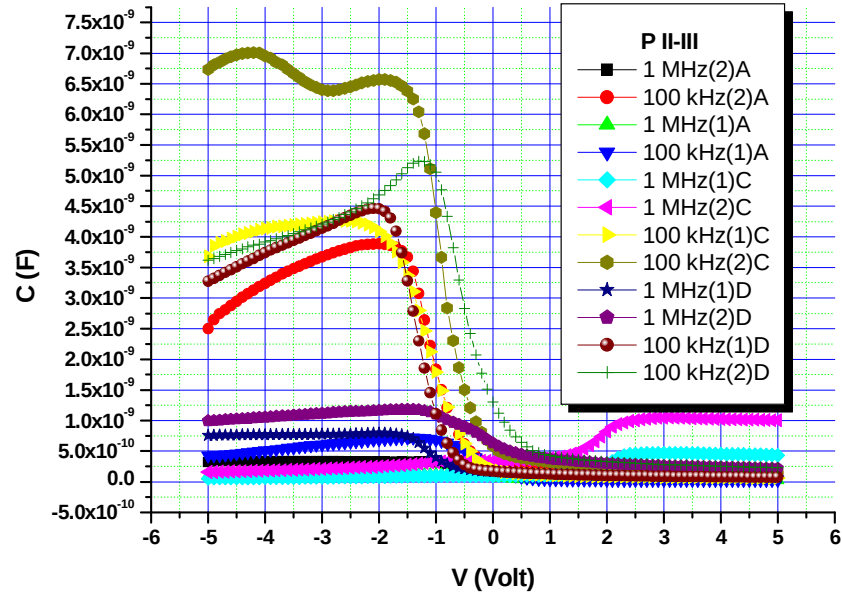
Hazırlamış olduğumuz eklemlerin C-V ölçümlerine ait grafikler aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Tablo 4.4 'teki katalog ifadelerine göre grafiklerin üzerlerinde tanımlamalar vardır. Katalogladığımız numune için tanımlama, örnek olarak:

P II-III : p -tipi Si – Alttaban Al – Tavlanmış,

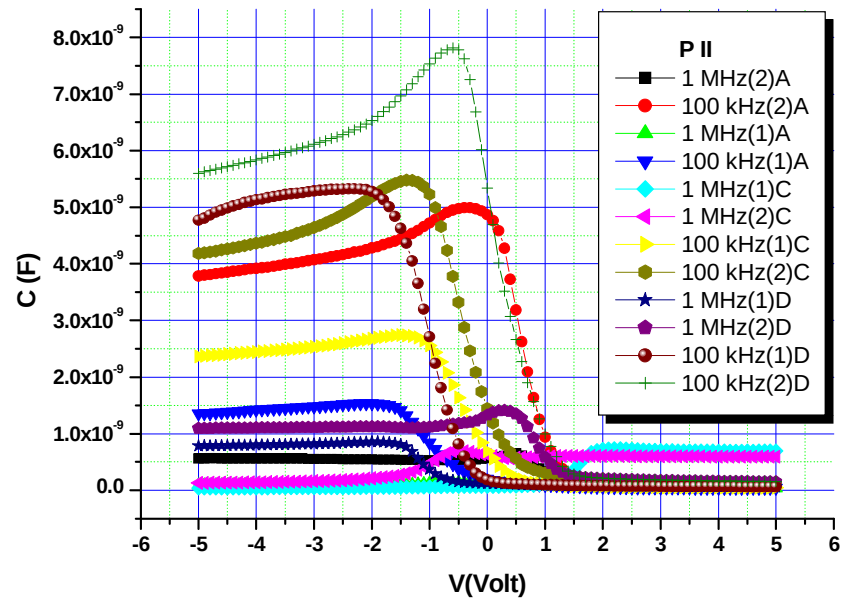
1 MHz(2)A : Kapasitans Ölçüm Frekansı- Diyot Kontak Çapı- Yapılan İşlem Serisi, şeklindedir.

Kapasitans-voltaj ölçümleri, oda sıcaklığında ve 100kHz ile 1MHz frekanslarında yapılmıştır. ± 5 voltluk besleme altında veriler alınmıştır. p -tipi Si

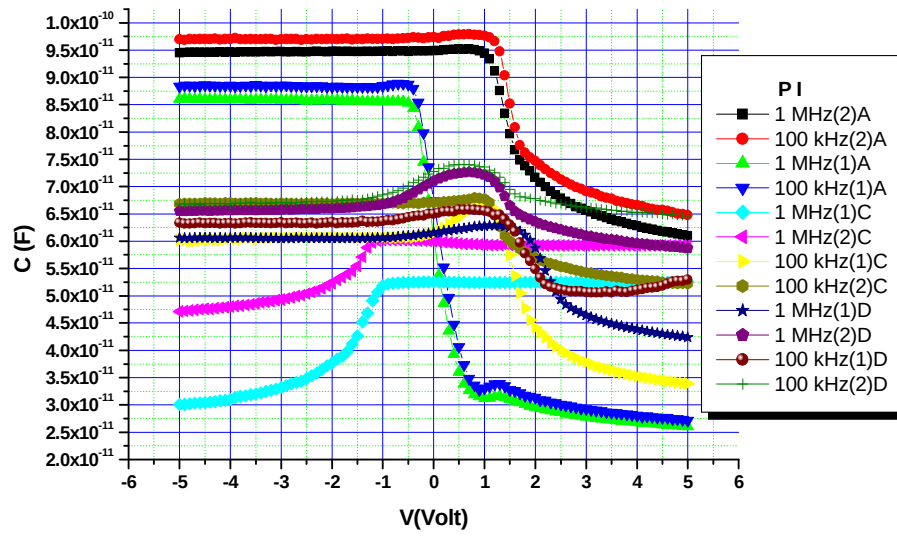
içeren eklemlerde çoğunluk taşıyıcılar delikler olup, şekil 5.9-10-11 'den de görüldüğü gibi, alıcı yoğunluklarının etkisi, ters beslemede kapasitif özellik gösterirler. C-V grafiklerindeki eğim değişiminden de görüldüğü gibi sergiledikleri davranış monoton değildir.



Şekil 5.9. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.

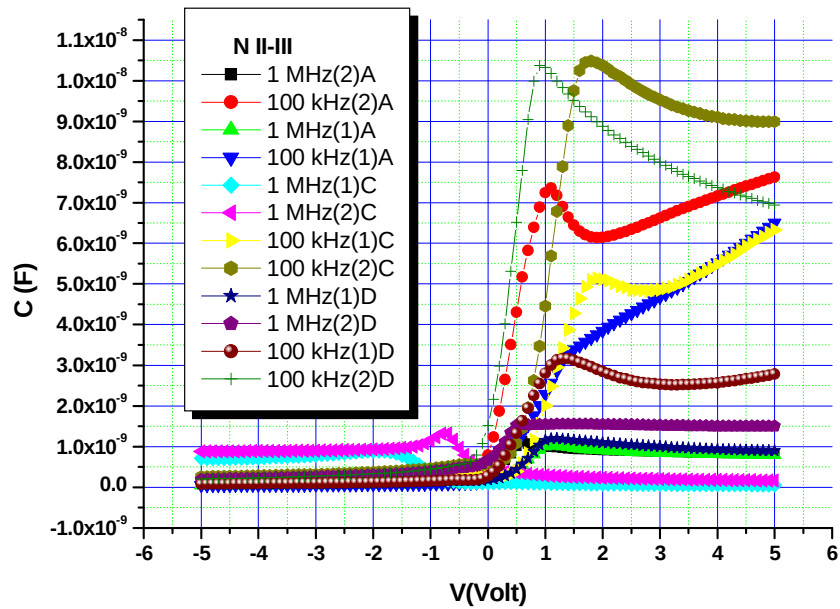


Şekil 5.10. Metal(Al)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.

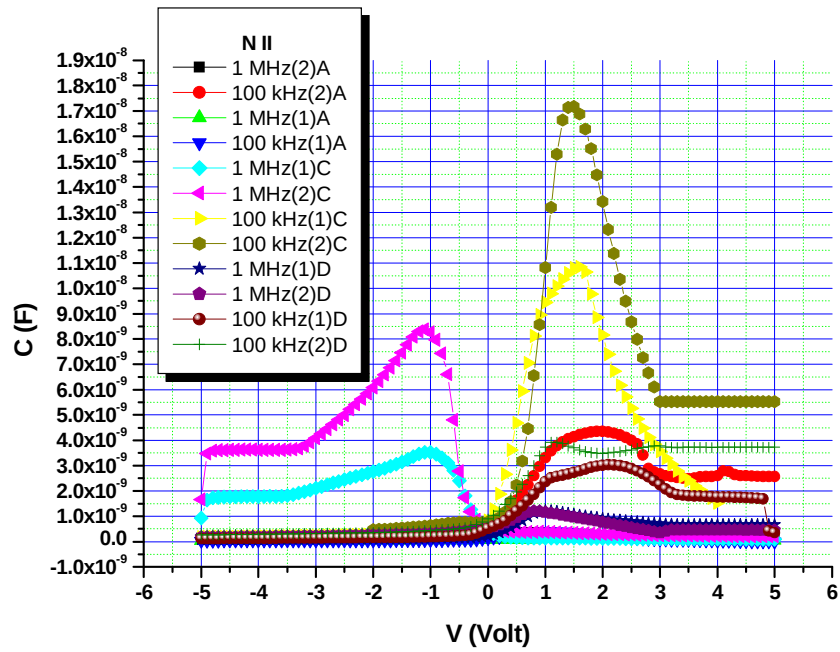


Şekil 5.11. *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.

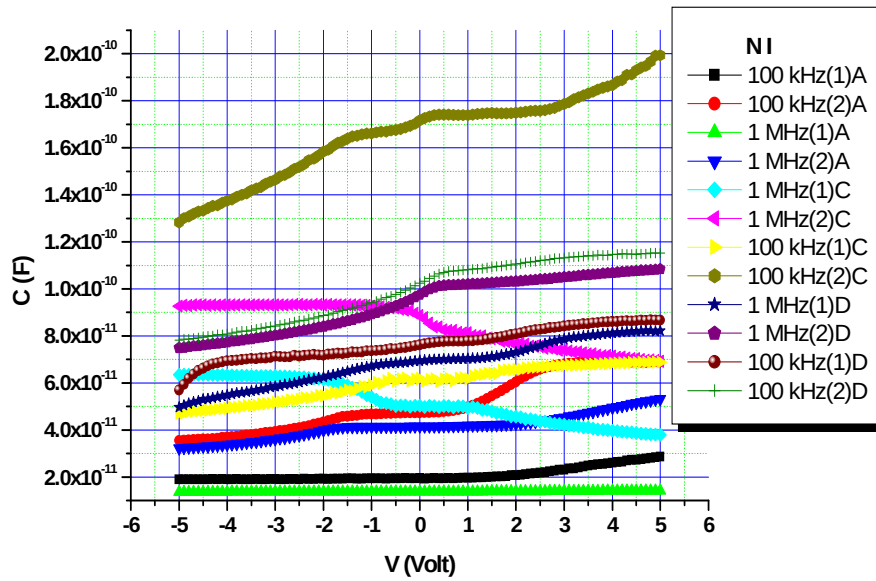
Alttaban Al kontak tavllanmış ile tavlانmamış arasındaki kapasitif değişim farkı vardır. Tavlانmışın kapasitif değişim etkisi daha küçüktür. Alttaban Al kontak olamayan örneklerde, şekil 5.11 ‘den de görüldüğü gibi kapasitansı azalmaktadır. Bu da beklenen durumdur. Bu durumu daha net olarak şekil 5.14 ‘te görülmektedir.



Şekil 5.12. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.



Şekil 5.13. Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.



Şekil 5.14. *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C-V grafiği.

Benzer biçimde, *n*-tipi Si içeren eklemelerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlar olup, şekil 5.12-13 'den de görüldüğü gibi, verici yoğunluklarının etkisi, ileri beslemede kapasitif özellik gösterirler. Fakat şekil 5.14 'te görüldüğü gibi, net olarak

kapasitif bir değişim gözlenmemiştir. Schotky kontakların kapsitif değerlerine bakıldığında, p -tipi Si 'da değişim daha nettir. Bu, p -tipi Si için alttaban olarak Al kullanılması daha uygun olacağı söylenebilir. Kontak alanı büyük olan eklemlerin kapasitif değişimlerinde büyük olduğu gözlenmiştir.

100 kHz 'deki ölçümlerden görüldüğü gibi, seri direncin etkisi özelliğinden dolayı kapasitansa cevabı daha nettir. Bu bize, derinlik seviyesi veya boşaltım tabakası hakkında bilginin, düşük frekanslara bağlı ölçümlerden de yapılabileceğini gösterir. 1MHz ölçümlerinde Schotky kontakların cevap verdiği görülmektedir. Düşük frekanslarda, kapasitanstaki artma seri direnç etkisinin ortadan kalkmasından ve yüksek frekanslarda, kapasitif azalmanın sızıntı akımından kaynaklandığı söylenebilir. Bu bize, Schotky kontakların yüksek frekansa duyarlı ve geniş bir çalışma alanına sahip olduğu sonucuna vardırır. Sonuç olarak, 100 kHz 'de kapasitif değişim 1MHz 'den daha yüksek olduğu, ama eklemlerin yüksek frekanslara da cevap verdiği görülmektedir. Bu ideal Schotky kontaklarda beklenen durumdur.

5.4. Diyot Parametreleri Hesaplanması

5.4.1. İdeallik Faktörü

İdeallik faktörü eklemeleri karakterizasyonunda önemli etkindir. Eklem termal dengede iken yani besleme yapılmadan önceki durumda ideallik faktörü $n = 1$ olur. Fakat eklem ideal olmayan durumlarda yani beslemede iken ideallik faktörü $n > 1$ olur. İleri besleme $\ln(I)$ - V grafiğindeki doğrusal kısmının eğiminden ideallik faktörü hesaplanır. İdeallik faktörü bağıntısı,

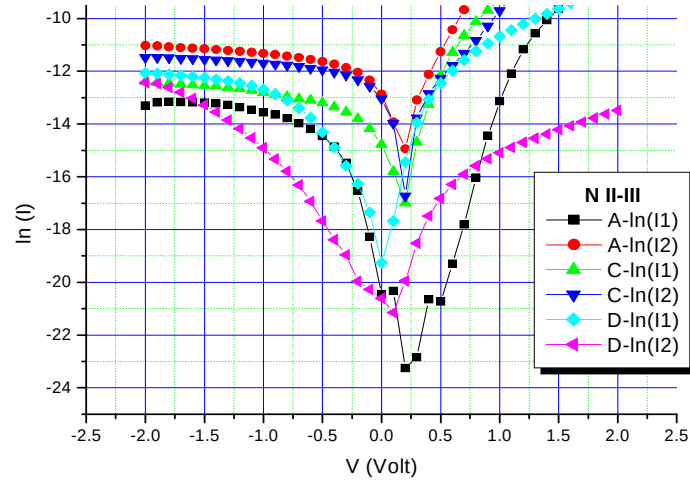
$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5.3)$$

ifadesinden hesaplanır. Doğrusal kısımda seri direnç etkisi önemli değildir. İdeallik faktörü (n) yüksek değerlerinin arayüzey tabaka uçlarına etkileri uygulanan besleme voltajının düşüşü nedenlerine bağlanır [Teircl, 2001]. Burda yukarda ifade ettiğimiz gibi daha hassas sonuçlar elde etmek için $\ln(I/(1 - \exp(-eV/kT)))$ - V grafiğinden de ideallik faktörü hesaplanır. Bu denklem (5.1) 'e göre düzenlendiğinde ideallik faktörü bağıntısı,

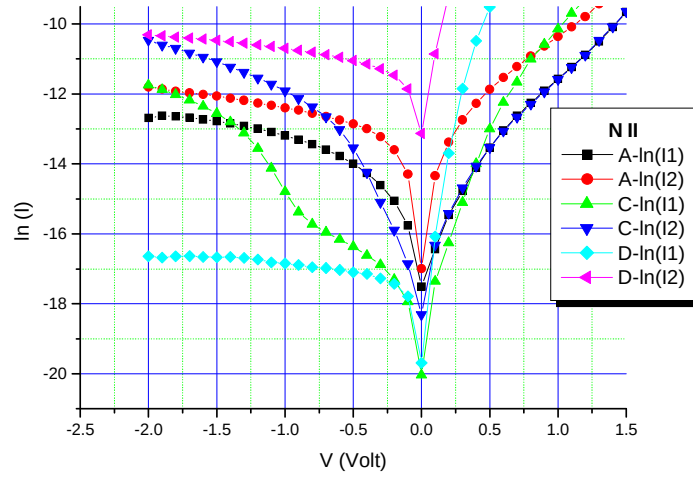
$$n = \frac{q}{kT} \cdot \frac{dV}{d(\ln(I/(1 - \exp(-eV/kT))))} \quad (5.4)$$

ifadesinden hesaplanır.

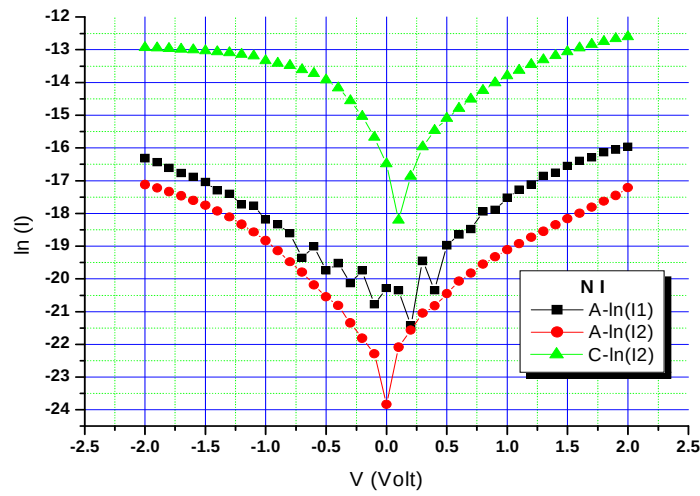
Hazırladığımız diyotların $\ln(I)$ - V grafikleri aşağıda verilmiştir. Bunların hangi tür eklem olduğu grafikler üzerinde ifade edilmektedir. Bu grafiklerin verilerinden yararlanarak ve denklem (3.2) 'den ideallik faktörleri hesaplandı. Aşağıdaki grafiklerin eğiminden $dV/d\ln(I)$ değerleri bulundu. Hesaplanan ideallik faktörü değerleri tablo 5.2 'de verilmiştir.



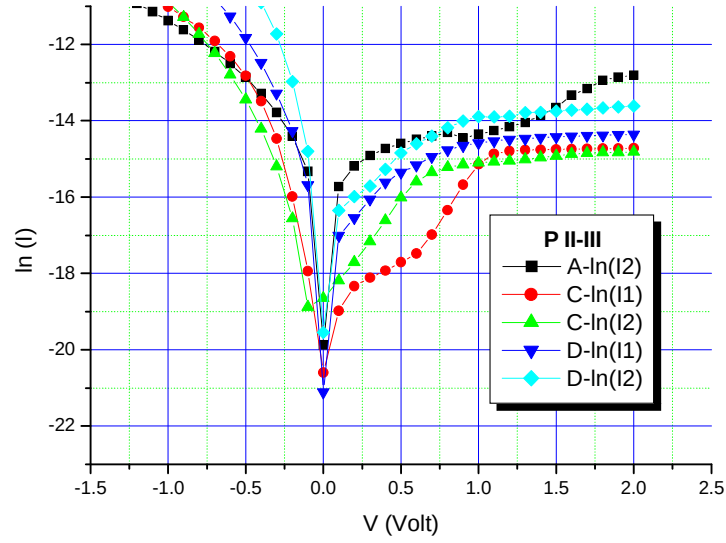
Şekil 5.15. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.



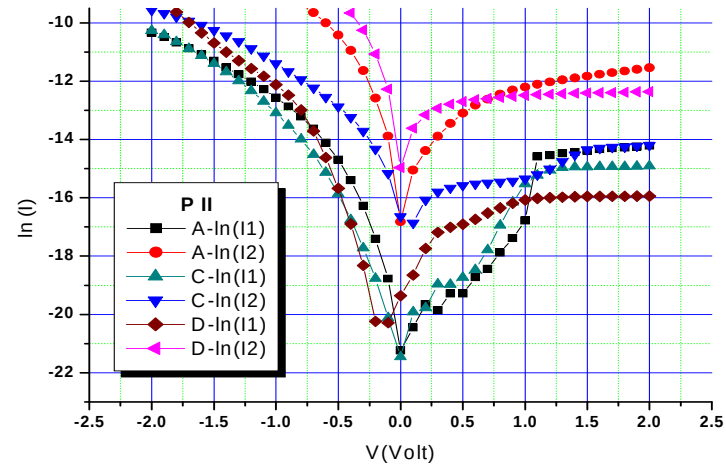
Şekil 5.16. Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.



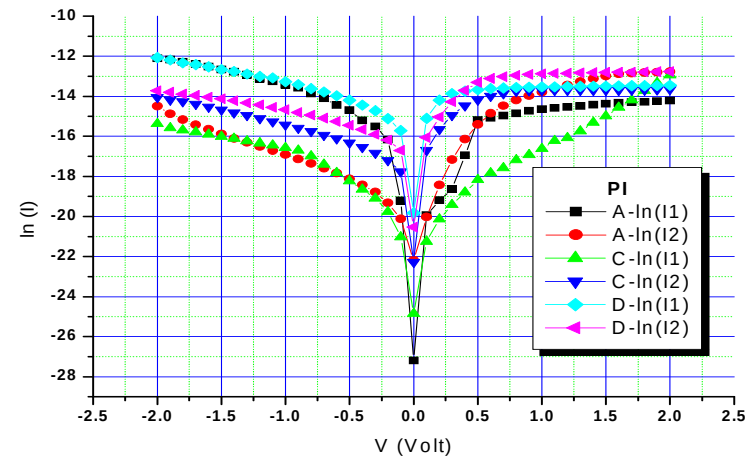
Şekil 5.17. *n*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.



Şekil 5.18. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.



Şekil 5.19. Metal (Al)/ *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.



Şekil 5.20. *p*-tipi Si/ Cu(A-D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait $\ln(I)$ -V grafiği.

Tablo 5.2. Eklemlerin deneysel olarak hesaplanmış ideallik faktörleri (I1, 1mm çaplı ekleme ait, I2, 2mm çaplı ekleme ait değer).

n (İdeallik Faktörü)	II-III		II		I	
	n-tipi (I1-I2)	p-tipi (I1/I2)	n-tipi (I1/I2)	p-tipi (I1/I2)	n-tipi (I1/I2)	p-tipi (I1/I2)
Metal						
Cu	1.96-2.74	-1.41	3.76-2.13	2.01-1.82	4.7-3.4	2.08-2.70
Ag	2.06-1.99	1.67-2.10	2.04-2.06	2.87-3.32	-3.4	1.52-1.51
Cu	2.02-2.9	1.12-1.18	1.29-1.94	2.31-1.98	-	1.94-1.78

5.4.2 Engel Yüksekliği

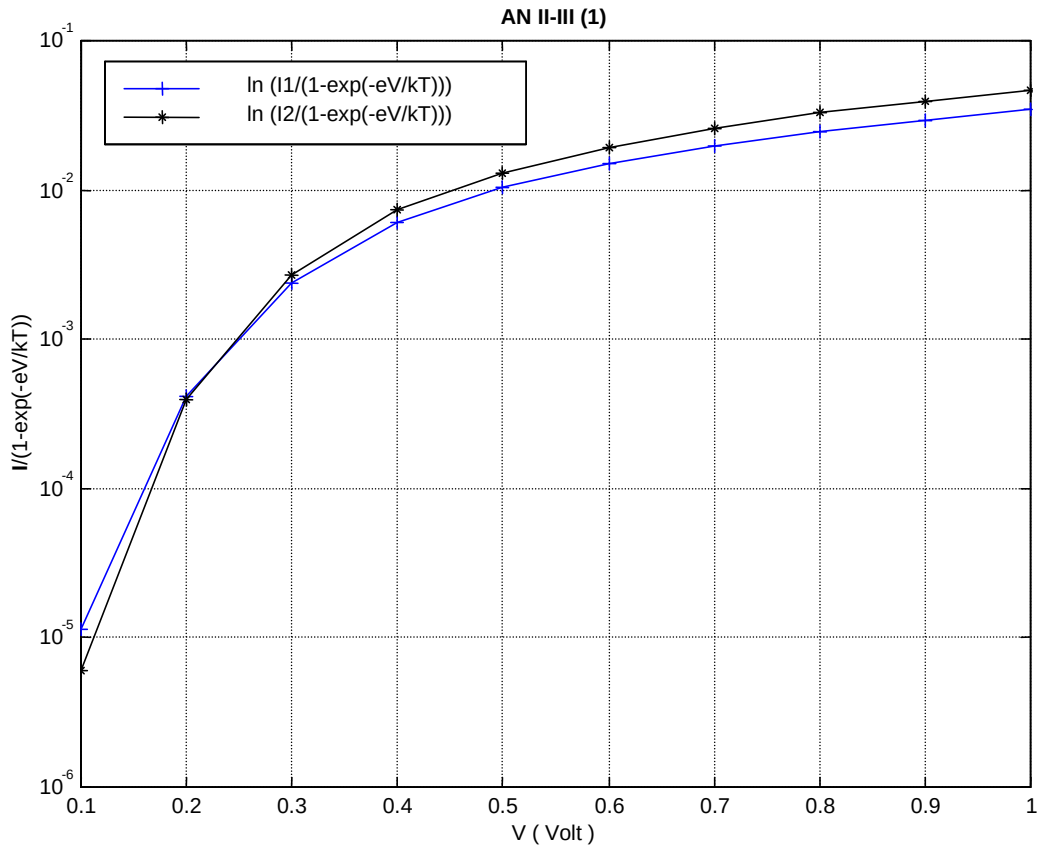
Eklemlerin engel yüksekliği: akım-voltaj (I - V) ölçümü, aktivasyon enerji ölçümü, kapasitans-voltaj (C - V) ölçümü, fotoelektrik ölçümü gibi yöntemlerden heaplandığını ifade etmiştik. Metal-yarıiletken eklemlerin engel yüksekliği değerleri yarı logaritmik ileri ve geri besleme I - V incelenmesi ve C - V ölçümleri yardımıyla yapıldı. Potansiyel engel yüksekliği besleme voltajına bağlıdır [Teircl, 2001]. I - V

ölçümünden engel yüksekliği hesaplanır. $\phi_B = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{AA^{**}T^2}{I_0}\right)$ bu denklemden

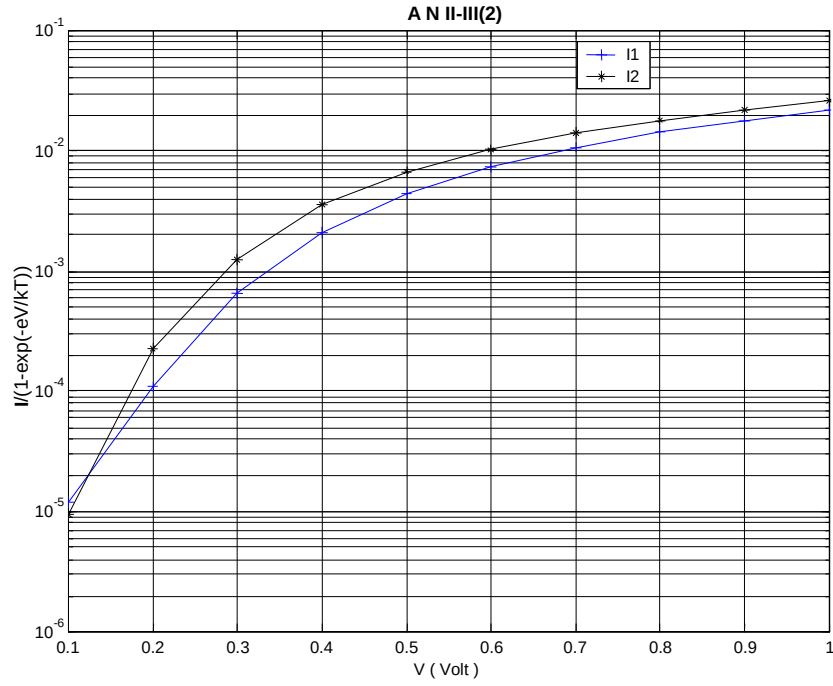
hesaplanan eklem potansiyel engel yüksekliği aşağıdaki tabloda verilmiştir. Doymuş akım (I_0) değerini, $\ln(I/(1-\exp(-eV/kT)))$ - V (Matlab programında hesaplayıp, yarı-logaritmik olarak çizilen) grafiğinin doğru kısmının $V=0$ iken y eksenini kesmiş olduğu değerdir. Deneysel hesaplamada elde ettiğimiz sonuçlar tablo 5.3 'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Eklemlerin deneysel olarak hesaplanmış potansiyel engel yükseklikleri (I1, 1mm çaplı ekleme ait, I2, 2mm çaplı ekleme ait değer).

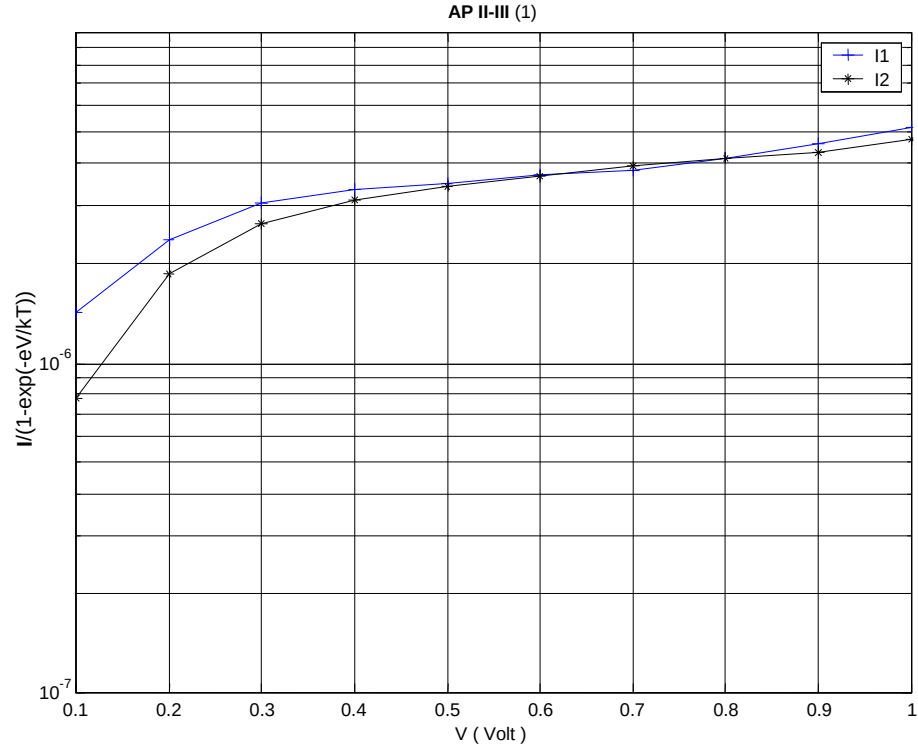
Metal (pot.engel yük.)	II-III		II		I	
	n-tipi (I1-I2)	p-tipi (I1/I2)	n-tipi (I1/I2)	p-tipi (I1/I2)	n-tipi (I1/I2)	p-tipi (I1/I2)
Cu (eV)	0.56-0.61	0.78-0.82	0.58-0.51	0.85-0.77	0.72-0.77	0.68-0.72
Ag (eV)	0.73-0.71	0.88-0.88	0.85-0.83	0.80-0.88	-0.78	0.97-0.96
Cu (eV)	0.76-0.66	0.87-.....	0.85-0.81	0.93-0.85	0.86-0.88	0.91-0.98



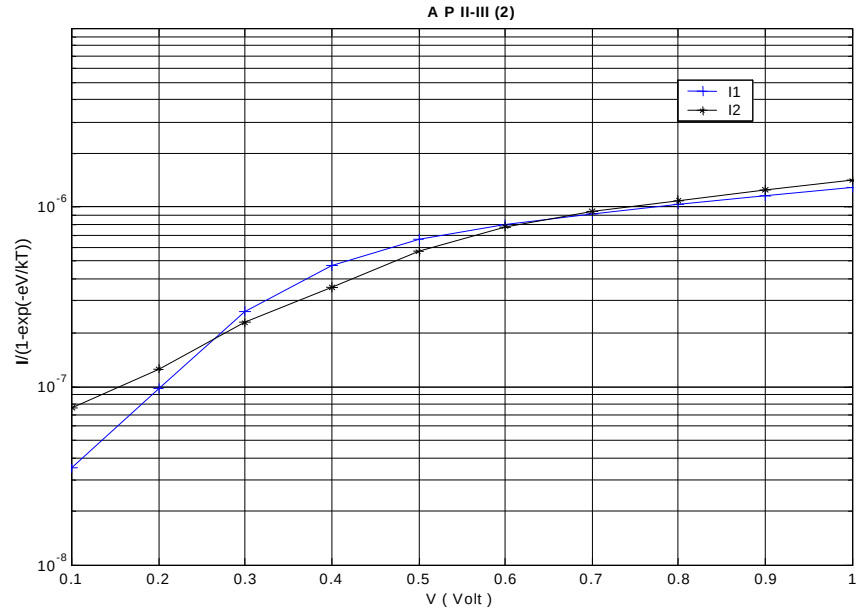
Şekil 5.21. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 1mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.



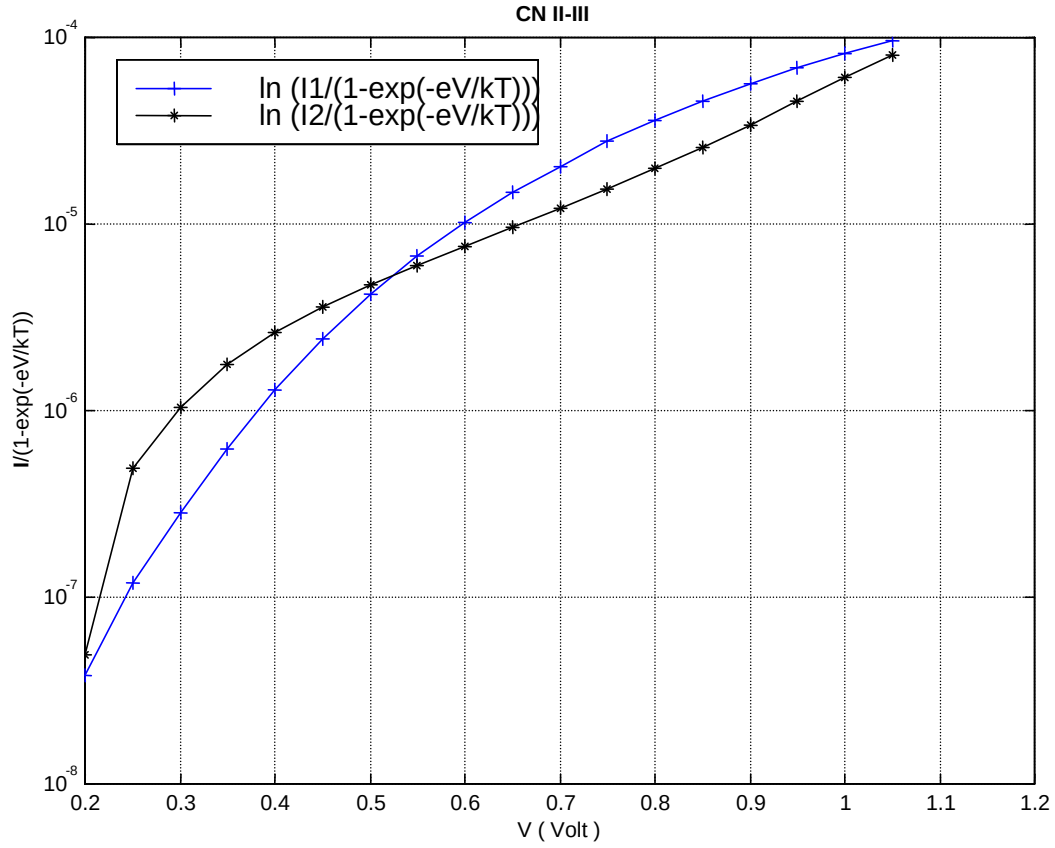
Şekil 5.22. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si /Cu (kontak çapı 2mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.



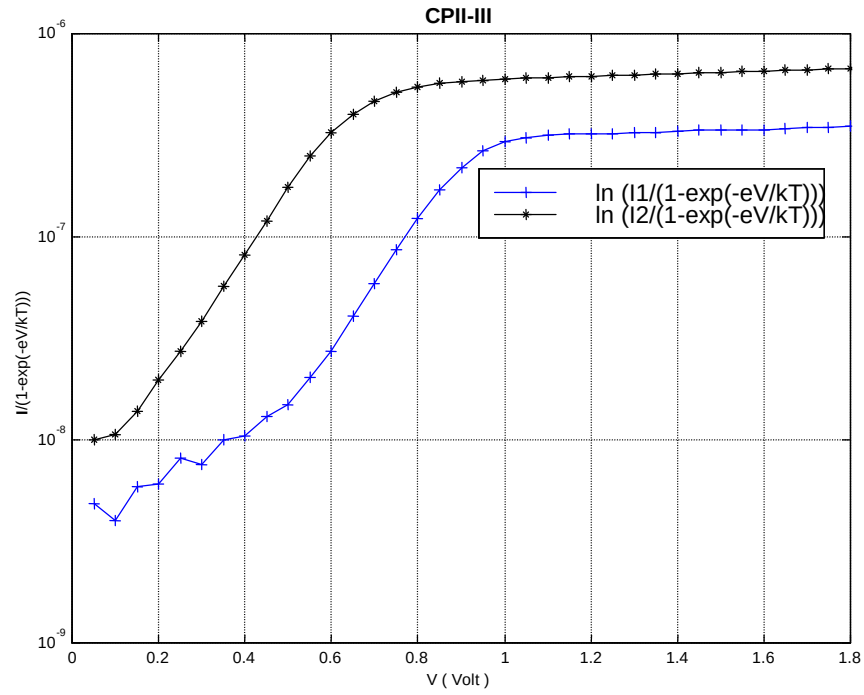
Şekil 5.23. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 1mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.



Şekil 5.24. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu (kontak çapı 2mm) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.



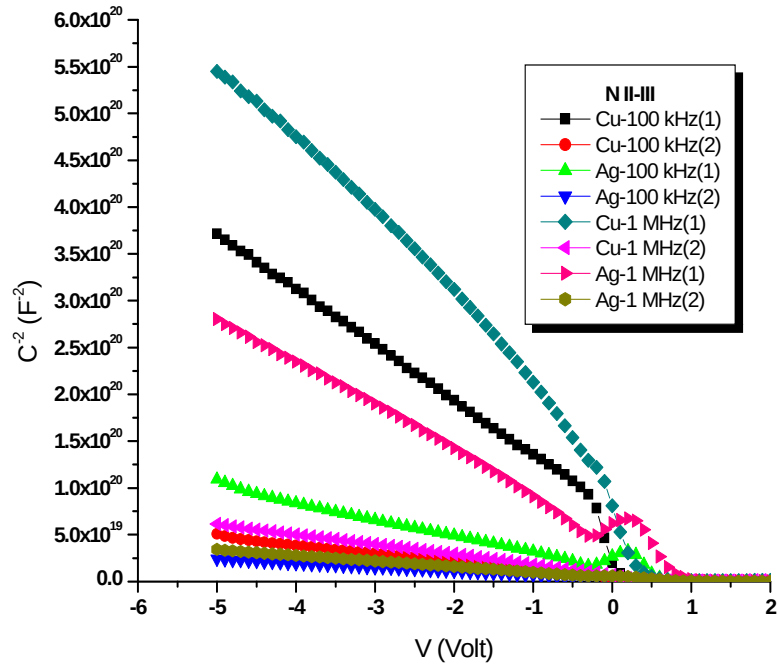
Şekil 5.25. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Ag (I1,1mm ve I2, 2mm kontak çaplı) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.



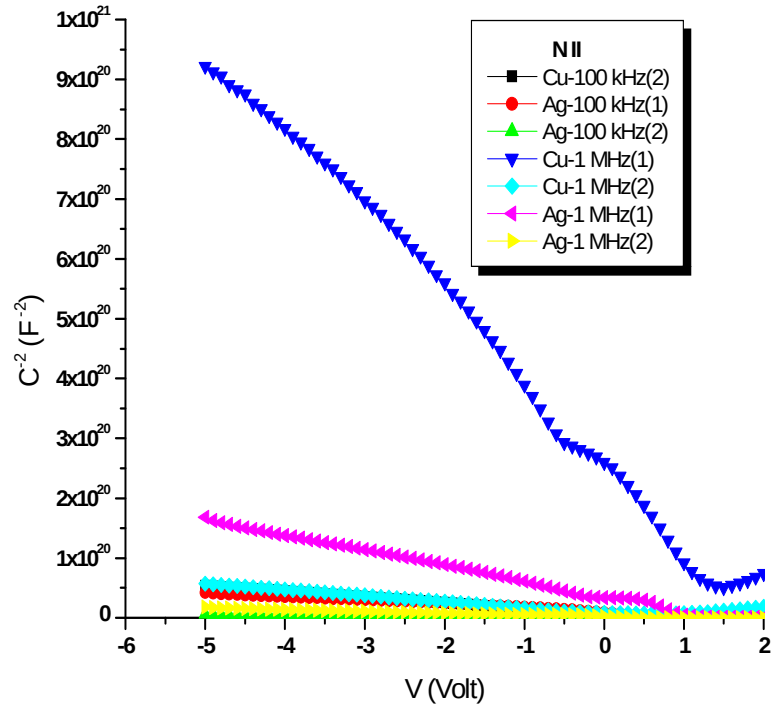
Şekil 5.26. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Ag (I1,1mm ve I2, 2mm kontak çaplı) eklemine ait, logaritmik $I/\{1-\exp(-qV/kT)\}$ karşı V grafiği.

5.4.3. Yarıiletken Tarafındaki Engel Yüksekliğinin Hesaplanması

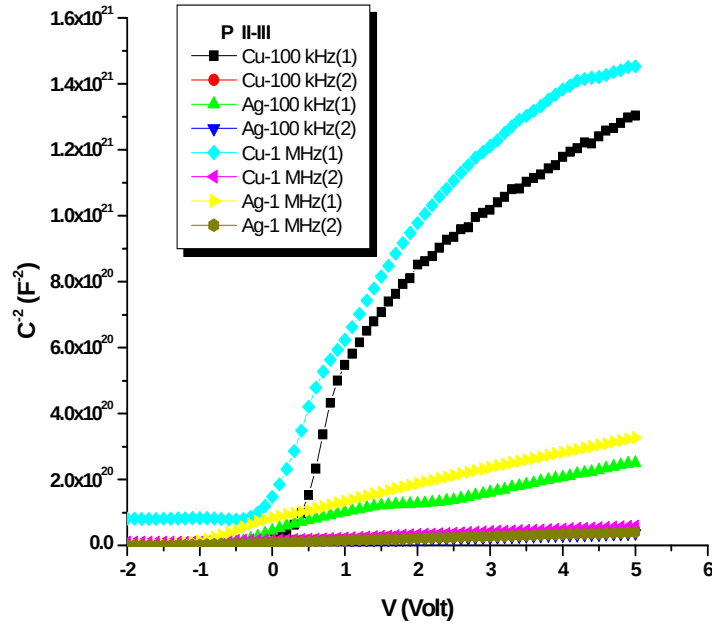
Metal-yarıiletken kontaklarda, her iki tarafında akım transferini zorlayıcı etkide bulunacak bir engel yüksekliği bulunur. Termal denge ve besleme durumunda oluşan potansiyel engel, eklemi oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Metalden yarıiletkene doğru oluşacak akıma karşı koyan engel teorik ve deneysel olarak hesaplandı. Yarıiletkenden metale doğru oluşacak akımda engelin oluşup; azalıp, artması beslemeye bağlıdır. Bu engele de iç-potansiyel demıştik. Yahut yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği olarakta ifade edilir. Bu iç-potansiyel, alıcı ve verici yoğunluğu enerji seviyeleri toplamı kararlı yapıdaki engel yüksekliğini verir.



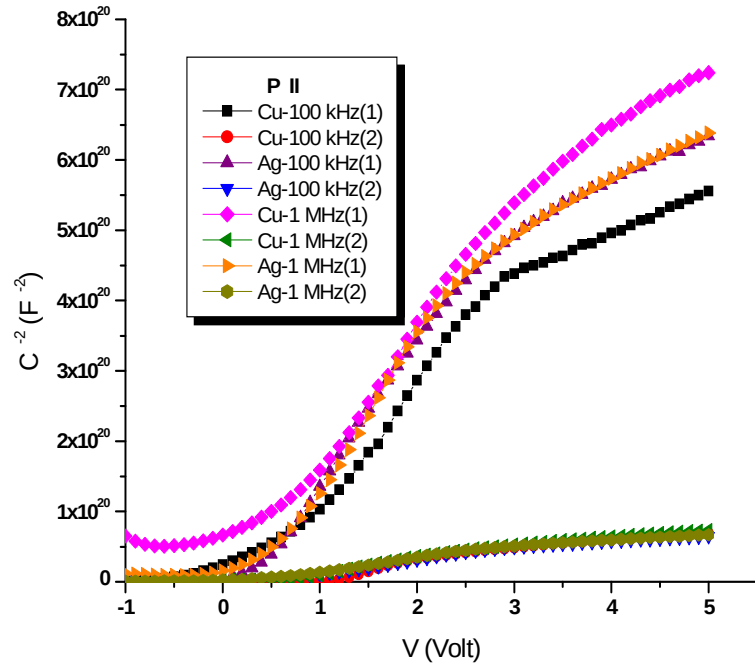
Şekil 5.27. Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *n*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^2 - V grafiği.



Şekil 5.28. Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği.



Şekil 5.29. (c) Metal (Al 450 °C, 15 dk)/ *p*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} - V grafiği.



Şekil 5.30. Metal (Al)/ *n*-tipi Si/ Cu(D Serisi) veya Ag(C Serisi) eklemine ait C^{-2} -V grafiği.

100 kHz ve 1 MHz frekanslarında ölçülmüş olan C -V grafiklerinden elde edilmiş C^{-2} -V grafikleri şekil 5.27-28-29-30 ‘da verilmektedir. Bu grafiklerin C^{-2} ‘ye karşı düzgün çizgi çizilerek yatay eksenini kestiği nokta birikme potansiyeli farkı V_{bi} (“built-in” potansiyel) değerini vermektedir. Bu yüksek ve düşük frekans eğrileri şekil 3.11 ‘deki grafikler ile uyum içindedir. Bu yöntemle okunan iç potansiyel değerleri tablo 5.4 ‘teki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 5.4. Eklemelerin deneysel olarak hesaplanmış “built-in” potansiyeli (V_{bi}) (1 ve 2 mm çaplı eklemelere ait).

V_{bi} “built-in” potansiyel	n-tipi		p-tipi	
	100 kHz (1-2) mm	1 MHz (1-2) mm	100 kHz (1-2) mm	1 MHz (1-2) mm
Metal				
	II-III			
Cu (eV)	0.34-0.45	0.29-0.45	0.57-0.45	-0.34
Ag (eV)	0.49-0.45	0.45-0.48	0.41-0.41	0.63-0.57
	II			
Cu (eV)	-0.45	0.43-0.66	0.52-0.46	0.41-0.54
Ag (eV)	0.44-0.72	0.53-0.70	0.36-0.52	0.45-0.51

5.5. Deneysel Verilerin Teorik Değerlerle Karşılaştırılması

Yapılan bu çalışmada deneysel olarak elde ettiğimiz değerlerin teorik ve diğer çalışmalar ile uyumluluğunu karşılaştırıldı. Diğer çalışmalar ile uyum gösterir. Bu uyum metal-yarıiletken kontaklarda I - V grafikleri Schottky kontak özellik gösterdiğini ve daha duyarlı olması bakımından yarılogaritmik grafiklerden de anlaşılmaktadır. Schottky diyotların en belirgin özelliği olan kapasitif etkininde, ölçülen C - V grafiklerinden görüldü. Ölçüm metotlarına göre bulunan parametreler aşağıdaki tabloda verilir uyum halindedir.

Tablo 5.5 Diyot parametrelerine ait farklı uygulamalarda bulunan değerler ile teorik sonuçlar.

Kullanılan Metot	Eklem	Tip	Üst Metal	ϕ_B (eV) Engel Yüksekliği		n İdeallik Faktörü
				Deneysel	Teorik	Deneysel
Logaritmik [I/(1-exp(-qV/kT))]	II-III	N	Cu	0.56-0.61	0.52-0.60	1.28
			Ag	0.73-0.71	0.45-0.78	1.40
		P	Cu	0.78-0.82	0.46-0.52	
			Ag	0.88-0.88	0.54-0.67	
	II	N	Cu	0.58-0.51		1.42
			Ag	0.85-0.83		3.22
		P	Cu	0.85-0.77		
			Ag	0.80-0.88		
	I	N	Cu	0.72-0.77		1.38
			Ag	0.78		
		P	Cu	0.68-0.72		
			Ag	0.97-0.96		

C^{-2} -V	“Built-in” Potansiyel V_{bi} (eV)					
				Deneysel		Teorik
				100kHz 1 ve 2 mm	1MHz 1 ve 2 mm	
	II-III	N	Cu	0.34-0.45	0.29-0.45	0.33-0.31
			Ag	0.49-0.45	0.45-0.48	0.18-0.16
		P	Cu	0.57-0.45	-0.34	0.29-0.26
			Ag	0.41-0.41	0.63-0.57	0.44-0.41

	II	N	Cu	0.45	0.43-0.66	
			Ag	0.44-0.72	0.53-0.70	
		P	Cu	0.52-0.46	0.41-0.54	
			Ag	0.36-0.52	0.45-0.51	
Logaritmik ln(I)-V	İdeallik Faktörü n					
				II-III	II	I
		N	Cu	1.96-2.74	1.29-1.94	3.4
			Ag	2.06-1.99	2.04-2.06	3.4
		P	Cu	1.12-1.18	2.01-1.82	1.94-1.78
			Ag	1.67-2.10	2.87-3.32	1.52-1.51

6. SONUÇLAR/ÖNERİLER

Oluşturulan kontaklarda potansiyel engel oluşmakta ve bu durum yapılan hesaplamalardan da görüldüğü gibi metal türüne bağlı olarak değişmektedir. Yarıiletken tarafındaki birikme potansiyeli uygulanan beslemeye göre değişim göstermektedir. İdeallik faktörü metal türüne bağlı olmayıp voltaja bağlı değişim göstermektedir. Burada ideallik faktöründeki değişim, ekleme ait engel yüksekliğindeki düzensizlikten kaynaklanmakta ve beslemeye göre akım transferindeki değişimde ifade etmektedir.

Altaban kontak için üç değişik parametre uygulanmıştır ve bunlar arasında omik davranış, şimdiye kadar yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir. Alttabanın arka yüzeyine fiziksel ve mekaniksel olarak dayanıklılığını artırmak ve elektronik devre elemanlarında kullanılması için uygun metal kaplanması ve gerekiyorsa tavlama işleminin gerekliliği anlaşılmıştır. İdeal durum olarak Al kaplanması ve oksitlenmeyi önleyici bir ortamda 450 °C 'de yaklaşık 15 dakika tavlama işlemi iyi sonuçlar vermektedir. Bu da tavlama işleminden önce ve sonra okunan yüzey direncindeki düşüşten anlaşılmaktadır.

Amaca göre *p*-tipi ve *n*-tipi Si alttaban seçilerek; ileri ve ters besleme doğrultucusu olarak kullanılabilir. Kontak alanı küçük olan eklemler iyi sonuçlar verdiğinden, bu tür kontakların işlevselliği daha küçük alanlarda artırılabilir. Schottky kontakların yüksek frekanslara cevap verip geniş kullanım alanı sağladığı gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Aboellfotoh M. O., and Svensson B., G., *Semicon. Sci. Technol.*, 6, 647-652 (1991)
2. Ahrens C., Ferretti R., Frieze G., Weidner J. O., *Microelectronic Engineering*, 37/38 (1997) 211-219
3. Bardeen J., "Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact", *Phys. Rev.*, 71, 717 (1947)
4. Beguwala M., and Crowel C. R., "Characterization of Multiple Deep Level Systems in Semiconductor Junctions by Admittance Measurements", *Solid State Electron*, 17, 203 (1974)
5. Bethe. H. A., "MIT Radiation Lab. " Rep, 43-12 (1942)
6. Braun F., "Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle", *Ann. Phys. Chem.* 153, 556 (1874)
7. C.Teircl et al./*Applied Science* 172 - 1-7 (2001)
8. Chang C. Y., Fang Y. K., and Sze S. M. "Specific Contact Resistance of Metal-Semiconductor Barriers", *Solid State Electron.*, 14, 541 (1971)
9. Cheung S. K., Cheung N. W., *Appl. Phys. Lett.*, 2 (49) 85, (1986)
10. Cowley A. M., and Sze S. M., "Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems", *J. Appl. Phys.*, 36, 3212 (1965)
11. Crowel C. R. and Sze S. M., "Current transport in metal-semiconductor barriers", *Solid-State Electron.*, 9, 1035 (1966)
12. Crowel C. R., Sarace J. C. and Sze S. M., "Tungsten-Semiconductor Schottky-Barrier Diodes", *Trans. Met. Soc. AIME*, 233, 478 (1965)
13. Donald A. Neamen, "Semiconductor Physics & Devices Basic Principles"
14. *Encyclopedia of Applied Physics*, Vol. 16
15. Henisch H. K. "Rectifying Semiconductor Contacts", Oxford, (1957)
16. Kwok H. L., "Electronic Materials", PWS Publishing Company, University of Vitoria, (1997)
17. Kwok K. Ng, "Complete Guide to Semiconductor Devices", McGraw-Hill, Inc., (1995)
18. Lepselter M. P. and Andrews, "Ohmic contacts to Silicon", 4. 7 (1969)
19. Lepselter M. P. and Sze S. M., "Silicon Schottky barrier diode with near-ideal I-V characteristics", 47, 195 (1968)

20. Mikhelashvili V., Eisenstein G., Uzdin R., Solid-State Electronics, 45, 143-148 (2001)
21. Milnes A. G., "Semiconductor devices and integrated electronics", Van Nostrand, New York, 1980
22. Missous M., Rhoderick E. H. and Singer K. E., J. Appl. Phys. 60, 2439. Monch, W. (1986)
23. Mott N. F., "Note on the contact between a metal and an insulator on semiconductor", 34, 568, (1938)
24. Norde H., J. Appl. Phys., 7 (50) 5052, (1979)
25. Nuhoglu Ç., Sağlam M., and Türüt A., Semicond. Sci. Technol., 14 (1999) 114-117
26. Rhoderick E. H., "Metal-Semiconductor Contacts", Clarendon Press. Oxford (1988)
27. Rhoderick E. H., "Metal-Semiconductor Contacts", Clarendon, Oxford, 1978; "Transport Processes in Schottky Diodes," in K. M. Pepper, Ed, Inst. Phys. Conf. Ser., No. 22, Institute of Physics, Manchester, England, 1974, p.3.
28. Roberts G. I., and Crowel C. R., "Capacitive Effects of Au and Cu Impurity Levels in Pt n-type Si Schottky Barriers", Solid State Electron, 16, 29 (1973)
29. Sato K., and Yasumura Y., J. Appl. Phys., 9 (58) 3655, (1985)
30. Schottky W., "Halbleitertheorie der Sperrschicht", Naturwissenschaften, 26 843, Dec. (1938)
31. Schottky W., "Semiconductor theory of Blocking Layer (in German)", Naturwissenschaften, 26 843, Dec. (1938)
32. Stradling R. A., Klipstein P. C. "Growth and Characterisation of Semiconductor", Adam Hilger, Bristol and New York (1990)
33. Sze S. M., "Physics of Semiconductor Devices", New York (1981)
34. Temircl C., Bati B., Sağlam M., Türüt A., Appl. Surface Science 172 1-7 (2001)
35. Tung R., "Schottky barrier formation at single crystal metal-semiconductor interfaces", 52. 461 (1984)
36. Wilson A. H., "The Theory of Electronic Semiconductors", Proc. R. Soc. Lond. Ser. A., 133, 458 (1931)

ÖZGEÇMİŞ

1974 Rize ‘nin Ardeşen ilçesinde doğdu. İlkokulu Seslikaya köyünde 1985 yılında tamamladıktan sonra, Orta ve Lise öğrenimini Ardeşen ilçesinde 1992 yılında tamamladı. 1993 ‘te Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde öğrenimine başladı ve Temmuz 1997 ‘de mezun oldu. Şubat 1998 ‘de G:Y:T:E Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisansa başladı. Ağustos 1998 ‘den itibaren G.Y.T.E. Fen Fakültesi Fizik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.