

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Cr/Si SCHOTTKY EKLEMLERİN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Fizikçi Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU

**FBE Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kubilay KUTLU

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Silisyumun yapısal özellikleri	3
2.2 Krom Elementinin Yapısal Özellikleri	8
2.3 Metal-Yarıiletken Kontaklar	9
2.3.1 Schottky Kontaklar	10
2.3.1.1 Arayüzey Durumlar	13
2.3.1.2 İletim Mekanizmaları	15
2.3.1.3 Akım-Voltaj Ölçümlerinden Bariyer Yüksekliğinin Elde Edilmesi	19
2.3.1.4 Kapasitans-Gerilim Ölçümlerinden Bariyer Yüksekliğinin Elde Edilmesi	21
2.3.2 Omik Kontak	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	25
3.1 Cr/Si Eklemlerin Hazırlanması	25
3.1.1 Altlıkların Hazırlanması	25
3.1.2 Elektron-Demeti Buharlaştırma Metodu ile Kaplama	25
3.2 Eklemlerin Elektriksel Özellikleri	28
3.2.1 I-V Ölçümleri	28
3.2.2 C-V Ölçümleri	30
3.3 I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	30
3.4 C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	31
3.5 Isıl İşlem	32
4. BULGULAR	33
4.1 Çeşitli Cr/ Si Eklemlerin Karanlıktaki I-V Karakteristikleri	33
4.2 Cr/Si Eklemlerin Fotovoltaik Özellikleri	35
4.3 Cr/n-tipi Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı I-V Karakteristikleri	40
4.4 Cr/p-tipi Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı I-V Karakteristiği	41
4.5 Cr/Si Eklemlerin İletim Mekanizması	42
4.6 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si Eklemlerin Aktivasyon Enerjisi	45
4.7 Cr/n-tipi ve Cr/p-tipi Si Eklemlerin Diyot Parametrelerinin Sıcaklıkla Değişimi	45
4.8 Cr/n-Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı C-V Karakteristiği	47

4.9	Cr/p-Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı C-V Karakteristiğı	50
4.10	Isıl İşlem Sonrası Cr/Si Eklemlerin I-V Karakteristiğı	56
4.11	Fotovoltaik Özellikler	60
5.	SONUÇ VE TARTIŞMALAR	62
KAYNAKLAR		64
ÖZGEÇMİŞ		65

SİMGE LİSTESİ

i	Bariyer yüksekliği
c	ideal durumdaki bariyer yüksekliği
η	İdealite faktörü
CrSi_2	Krom Silisid
ReSi_2	Renyum Silisid
$\beta\text{-FeSi}_2$	β - Demir Silisid
Cr	Krom
Si	Silisyum
As	Arsenik
Sb	Antimon
P	Fosfor
N	Azot
In	İndiyum
Ga	Galyum
Al	Alüminyum
B	Bor
Ag	Gümüş
ϵ_r	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
m_e	elektronun kütlesi
m_e^*	elektronun etkin kütlesi
E_H	Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi
m_h	Deliklerin (hole) kütlesi
m_h^*	Deliklerin etkin kütlesi
$\vec{k}$	Dalga vektörü
χ	Alınganlık (afinite)
N_c	İletim bandındaki durumların yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
n_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu
μ_n	elektronların mobilitesi
μ_p	deliklerin mobilitesi
$q\Phi_m$	iş fonksiyonu
$q\Phi_n$	İletim bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
E_c	İletim bandının taban enerjisi

E_F	Fermi enerji seviyesi
E_V	Valans bandının tavan enerjisi
E_g	Yasak band enerjisi
δ	Kontak edilen metal-yarıiletken arasındaki mesafe
W_D	Fakirleşme bölgesinin genişliği
C_D	Fakirleşme bölgesinin kapasitansı
N_D	Donör konsantrasyonu
ϵ_S	Silisyumun permitivitesi
V	Uygulanan besleme voltajı
V_F	doğru yönde besleme
V_R	Ters yönde besleme
Φ_{bi}	Oluşum (built-in) voltajı
k	Boltzmann sabiti
T	Sıcaklık
q	temel yük
Φ_{SS}	Arayüzeydeki yük
Φ_D	Fakirleşme bölgesindeki yük
$q\Phi_0$	Arayüzey durumların nötral enerji seviyesi
ϵ_i	Arayüzeyssel tabakanın permitivitesi
D_{it}	Arayüzeyssel tuzak sayısı

KISALTMA LİSTESİ

MS	Metal-Yarıiletken Kontak
I-V	Akım-Gerilim
C-V	Kapasitans-Gerilim
fcc	Yüzey merkezli kübik kristal yapı
bcc	Cisim merkezli kübik kristal yapı
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı.....	3
Şekil 2.2 Elmas yapı	4
Şekil 2.3 Asal yarıiletkenin enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)	4
Şekil 2.4 n-tipi Si (donör katkılı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007).....	5
Şekil 2.5 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)	5
Şekil 2.6 p-tipi Si (akseptör katkılı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007).....	6
Şekil 2.7 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)	6
Şekil 2.8 (a) direkt ve (b) indirekt bandlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992)	7
Şekil 2.9 cisim merkezli kübik yapı (bcc yapı)	9
Şekil 2.10 (a) Birbirinden izole metal ve n-tipi yarıiletkenin band diyagramı. (b) metal-yarıiletken kontağın band diyagramı (Ohring M., 1992).....	10
Şekil 2.11 metal-yarıiletken kontakların enerji-band diyagramları. Metal ve yarıiletken (a) birbirinden ayrı iken, (b) bir sistemde birleşmiş halleri. Kontak mesafesi (δ) (c) azalmış durumda iken, (d) sıfır olduğu durum. (Sze M. S., 2007).....	11
Şekil 2.12 Metal-n-tipi (solda) ve p-tipi (sağda) yarıiletken kontakların farklı beslemeler altındaki enerji-band diyagramları. (a) Termal dengedeki durum, (b) doğru besleme, (c) ters besleme. (Sze M. S., 2007).....	13
Şekil 2.13 Atomik mesafeli arayüzey tabakasına sahip metal-n-tipi yarıiletken kontağın detaylı enerji-band diyagramı (Sze M. S., 2007)	14
Şekil 2.14 doğru gerilim altında beş temel iletim prosesi. (1) Termoyonik emisyon. (2) Tünelleme. (3) Rekombinasyon (yeniden birleşme). (4) Elektronların difüzyonu. (5) Deliklerin difüzyonu. (Sze M. S., 2007)	16
Şekil 2.15 Schottky diyotlar için akım-gerilim grafiği (Caferov T., 2000).....	20
Şekil 2.16 Schottky diyotun kapasitans-ters gerilim grafiği (Caferov T., 2000).....	21
Şekil 2.17 Kontak direncinin katkı konsantrasyonuna (ve E_{00}), bariyer yüksekliğine ve sıcaklığa bağlılığı. TE, TFE ve FE bölgelerini içermektedir. (Sze M. S., 2007)24	
Şekil 3.1 (a) Termoelektron emisyonu, (b) elektronların hızlanması ve (c) elektron yayılmasının gösterimi: 1 saçılan elektronlar, 2 termokatot, 3 vakum fanusunun tabanı, 4 yalıtkan, 5 termokatotun güç kaynağı, 7 hızlanmış elektron, 6 ve 8 anot, 9 elektron demeti (Caferov T., 2000).....	26
Şekil 3.2 Elektronun manyetik alanda hareketi (Caferov T., 2000)	26
Şekil 3.3 Elektron demeti ile buharlaştırma: 1 magnet kutbu, 2 elektromagnet, 3 soğutulan	

pota, 4 buharlaştırılan malzeme, 5 malzeme moleküllerinin akışı, 6 termokatot,	
7 odaklama sistemi, 8 elektron demeti, 9 ince film, 10 altlık (Caferov T, 2000)	27
Şekil 3.4 Elektron demeti buharlaştırma sistemi	28
Şekil 3.5 Oda sıcaklığında dc iletkenlik ölçüm sistemi	29
Şekil 3.6 Sıcaklığa bağlı dc iletkenlik ölçüm sistemi	29
Şekil 3.7 Sıcaklığa ve frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi	30
Şekil 3.8 Cr/n-tipi Si eklemine 360K sıcaklıktaki $\ln(I)$ -V grafiği	31
Şekil 3.9 Cr/n-tipi Si eklemine 340 K sıcaklıktaki $1/C^2 - V$ grafiği	32
Şekil 4.1 Cr/n-tipi Si eklemlerin oda sıcaklığında ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği	33
Şekil 4.2 Cr/p-tipi Si eklemlerin oda sıcaklığında ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği	34
Şekil 4.3 Cr/p-Si 1 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	35
Şekil 4.4 Cr/p-Si 2 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	36
Şekil 4.5 Cr/p-Si 3 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	36
Şekil 4.6 Cr/p-Si 4 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	37
Şekil 4.7 Cr/n-Si 1 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	37
Şekil 4.8 Cr/n-Si 2 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	38
Şekil 4.9 Cr/n-Si 3 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	38
Şekil 4.10 Cr/n-Si 4 nolu eklemine, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği	39
Şekil 4.11 Cr/n-tipi Si eklemine 300K ile 380K sıcaklık aralığında ölçülen akım gerilim değerleri	40
Şekil 4.12 Cr/p-tipi Si eklemine 300K ile 380K sıcaklık aralığında ölçülen akım gerilim değerleri	41
Şekil 4.13 Cr/p-Si eklemine $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği	42
Şekil 4.14 Cr/p-Si eklemine $I-1/T$ grafiği	43
Şekil 4.15 Cr/n-Si eklemine $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği	43
Şekil 4.16 Cr/n-Si eklemine $I-1000/T$ grafiği	44
Şekil 4.17 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si için $\ln(I_0)-(q/kT)$ grafiği	45
Şekil 4.18 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin idealite faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği	46
Şekil 4.19 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin I-V ölçümlerinden elde edilen ϕ_{bn} (bariyer yüksekliği) değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	46
Şekil 4.20 300K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	47
Şekil 4.21 320K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	48

Şekil 4.22 340K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	48
Şekil 4.23 360K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	49
Şekil 4.24 380K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	49
Şekil 4.25 360K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	50
Şekil 4.26 300K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	51
Şekil 4.27 320K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	51
Şekil 4.28 340K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	52
Şekil 4.29 360K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	52
Şekil 4.30 380K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği	53
Şekil 4.31 300K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	53
Şekil 4.32 320K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	54
Şekil 4.33 340K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	54
Şekil 4.34 360K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	55
Şekil 4.35 380K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği.....	55
Şekil 4.36 Isıl işlem sonrası 1 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği.....	57
Şekil 4.37 Isıl işlem sonrası 2 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği.....	57
Şekil 4.38 Isıl işlem sonrası 4 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği.....	58
Şekil 4.39 Isıl işlem sonrası 1 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği.....	58
Şekil 4.40 Isıl işlem sonrası 2 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği.....	59
Şekil 4.41 Isıl işlem sonrası 3 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği.....	59

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkenin çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007)	8
Çizelge 2.2 Krom metalinin parametreleri	9
Çizelge 4.1 Çeşitli Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin diyot parametreleri	34
Çizelge 4.2 Cr/Si eklemlerin fotovoltatik parametreleri.....	39
Çizelge 4.3 Cr/n-tipi Si eklem için değişik sıcaklıklardaki diyot parametreleri	40
Çizelge 4.4 Cr/p-tipi Si eklemin değişik sıcaklıklardaki diyot parametreleri	41
Çizelge 4.5 Cr/Si eklemlerin m ve l değerleri	44
Çizelge 4.6 Cr/n-Si eklem için değişik sıcaklıklarda C-V datalarından elde edilen parametreler	50
Çizelge 4.7 Cr/p-Si eklem için değişik sıcaklıklarda C-V datalarından elde edilen parametreler	56
Çizelge 4.8 Cr/Si eklemlerin tavlama sonrası diyot parametreleri.....	60
Çizelge 4.9 Cr/Si eklemlerin fotovoltatik parametreleri.....	61

ÖNSÖZ

Hazırlamış olduğum teze desteği, yönlendirmesi ve bana olan inancından dolayı çok saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Kubilay Kutlu'ya, tez çalışmamda benden fazla katkısı olan Yrd. Doç. Orhan Özdemir ve Dr. Beyhan Tatar'a teşekkürü bir borç bilirim. Sevgili oda arkadaşlarım Pınar Gökdemir ve Deneb Yılmazer'e, çalışma grubumuzdan Pelin Aydoğan'a destek ve yardımlarından ötürü çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisansımın ilk iki yılında çalışmış olduğum şirketteki (Hobim Bilgi İşlem A.Ş.) müdürlerime ve çalışma arkadaşlarıma bana göstermiş oldukları anlayıştan, beni yetiştirip büyüten ve her zaman destek olan aileme sevgilerinden ve bana olan inançlarından, iyi ve kötü günümde yanımda olan tüm arkadaşlarıma bana göstermiş oldukları sevgi ve destekten dolayı teşekkür ederim.

Arş. Gör. Ayşe Evrim BULGURCUOĞLU

Ağustos, 2008

ÖZET

Cr/Si metal-yarıiletken (MS) kontaklar, kimyasal olarak temizlenmiş olan n-Si(100) ve p-Si(111) altlıklar üzerine elektron demeti buharlaştırma metodu kullanılarak hazırlandı. Üretilen Cr/Si MS yapıların sıcaklığa bağlı karanlıkta akım-gerilim karakteristikleri alındı ve bu akım-gerilim karakteristiklerinden diyot parametreleri (idealite faktörü, bariyer yüksekliği) ve aktivasyon enerjisi elde edildi. Ayrıca bu eklemlerin oda sıcaklığında aydınlıkta ve karanlıkta akım-gerilim karakteristikleri alınıp fotovoltaiik özellikleri incelendi. Cr/Si Schottky diyotların frekansa ve sıcaklığa bağlı kapasitans-gerilim karakteristikleri incelendi ve buradan N_D katkılama miktarı ve bariyer yükseklikleri elde edildi. Çalışmanın son aşamasında Cr/Si Schottky diyotların performansını arttırmak için çeşitli sıcaklıklarda (400-500-600°C) tavlama işlemine tabii tutuldu ve bu işlemin diyotun elektriksel ve fotovoltaiik özelliklerine etkisi incelendi.

Sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliği ile kapasitans-gerilim ölçümlerinden elde edilen bariyer yükseklik değerleri kıyaslandı. Bu kıyaslama sonucunda akım-gerilim datalarından elde edilen bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla arttığı, kapasitans-gerilim datalarından elde edilen bariyer yüksekliğinin ise sıcaklıkla azaldığı gözlemlendi. Cr/n-Si için; I-V eğrilerinin 300-380 K sıcaklık aralığında elde edilen bariyer yüksekliği 0.87-1.08 eV arasında değişmekteyken, idealite faktörün değışiminin ise 1.65-1.14 arasında olduğu gözlemlendi. C-V eğrilerinin 360K sıcaklık için bariyer yüksekliği 0.86 eV olarak bulundu. Cr/p-Si için ise I-V eğrilerinden 300-380 K sıcaklık aralığında elde edilen bariyer yüksekliğinin değeri 0.85-1.05 eV arasındadır, idealite faktörü değeri ise 1.63-1.46 arasında değeri almaktadır. C-V datalarından 300-360K sıcaklık aralığında elde edilen bariyer yüksekliği 1.5-0.87 eV arasında değişmektedir. Tavlama sonrası numunelerin diyot özelliklerinin kötüleştiğı gözlemlendi.

Schottky eklemlerin karanlıkta alınan akım-gerilim karakteristiğinden, 10^2 kat doğrultucu özellik gösterdiği belirlendi. Termoiyonik emisyon modelini göz önüne alındığında, Cr/Si eklemlerin doğru yöndeki iletim mekanizmalarının düşük elektrik alan bölgesinde Cr/n-Si eklemler için omik, Cr/p-Si eklemler için Schottky alan emisyonu iletim mekanizmasının etkin olduğu belirlendi. Yüksek elektrik alan bölgesinde ise Cr/n-Si ve Cr/p-Si eklemler için SCLC (Space Charge Limited Current) iletim mekanizmasının baskın olduğu ortaya çıkarıldı.

Tavlama öncesi Cr/Si Schottky diyotların aydınlıkta alınan I-V karakteristiklerinin incelenmesiyle iyi fotovoltaiik parametrelere sahip oldukları gözlemlenmiştir. En iyi fotovoltaiik parametreleri Cr/p-Si MS türü yapılarda gözlemlendi ($I_{sc}=44.5 \mu A$, $V_{oc}=370 mV$). Tavlama sonrası ise yine Cr/p-Si MS yapılar en iyi fotovoltaiik özelliklere 600°C tavlama sıcaklığında elde edildi($I_{sc}=138.8 \mu A$, $V_{oc}=268 mV$).

ABSTRACT

Cr/Si metal semiconductor (MS) contacts were prepared on chemically cleaned n-Si(100) and p-Si(111) substrates by using electron-beam evaporation method. Produced MS structures were examined by dc current-voltage characteristic under various constant temperatures infer both fundamental diode parameters (ideality factor, barrier height) and current flow mechanism through determining activating energy. Moreover, I-V characteristics were also investigated under dark and light conditions at room temperature so that photovoltaic behavior of the structures can be studied. The frequency/temperature dependent ac capacitance-voltage (C-V) characteristic of Cr/Si Schottky diodes were reported and doping density and barrier height of the structure were obtained from the slope and its intercept on the voltage axis of $1/C^2$ vs V_G plot, respectively. As a step of study, Cr/Si Schottky diodes were annealed at different temperatures (400-500-600°C) in order to increase their performance and electrical/photovoltaic effects of this act were observed.

Extracted barrier height from I-V and C-V curves were compared which exhibited decline behavior for the first one and increasing attitude for the second as temperature increases, respectively. Specifically, the variates of barrier height of Cr/n-Si extracted from I-V curves, was in the range of 0.87-1.08 eV, whereas the ideality factor lied between 1.65 to 1.14 for the studied temperature interval (300-380K). Similarly, for Cr/p-Si, the range were in between 0.85-1.05 eV and 1.63-1.46, respectively. On the other hand, barrier height obtained from C-V curves were consistent with the ones from I-V curves. Remarkably, annealing (heat treatment) deteriorate the diode parameters unexpectedly.

The Schottky contacts' at hand have rectifying features, determined from I-V measurement under dark condition. As current flow mechanism, two bias regions were identified. Though different current flow mechanism exist in low applied bias voltage side (namely, Schottky emission for Cr/p-Si junction and ohmic mechanism for Cr/n-Si), SCLC was the common actual mechanism for both junctions at high bias voltage region.

After examining the I-V characteristics of pre-annealing Cr/Si diodes in light condition, they exhibited good photovoltaic parameters. The best photovoltaic parameters were exposed by Cr/p-Si MS contact ($I_{sc}=44.5 \mu A$, $V_{oc}=370 \text{ mV}$). The best post-annealing photovoltaic parameter was shown by Cr/p-Si MS contact which was annealed at 600°C ($I_{sc}=138.8 \mu A$, $V_{oc}=268 \text{ mV}$).

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontakların doğrultma özelliği 1874 yılında F. Braun tarafından keşfedilmiş olup daha kapsamlı teorik çalışmalar 1930'lu yıllarda Schottky tarafından yapılmıştır. Bu nedenle bu tür yapılar Schottky yapı olarak adlandırılır. Bu yapıların en belirgin özelliği metal ile yarıiletken arasında var olan bariyer yüksekliğidir ve bu nedenle bu tür yapılar doğrultucu özellik gösterirler.(Sze M. S. 2007)

MS eklemlerinin temel özelliklerini (bariyer yüksekliği (ϕ_{bno}), idealite faktörü (η) gibi) anlamak adına metal-yarıiletken kontakların ve onların arasında oluşan arayüzeyin ilişkisini ortaya koymak gerekir. Birçok deneysel çalışma bu yapıların elektriksel özellikleriyle arayüzey kalitesi arasında, arayüzeyin bariyer yüksekliğine etkisi gibi, kritik bir ilişkinin olduğunu vurgulamıştır. Bu arayüzey tabakasının varlığı MS yapılarıdaki idealite faktörünün 1 değerinden sapmasına neden olur. İdealite faktörünün 1 değerinden sapması tünelleme, jenerasyon-rekombinasyon akım mekanizmalarının varlığını ortaya koyar. Bu çerçevede etkin akım mekanizmasını tespit etmek için sıcaklığa bağlı akım-gerilim ve kapasitans-gerilim analiz tekniklerine başvurulur.

İndirekt band yapısına sahip olan silisyum; düşük maliyetli olması ve silisyum tabanlı devre elemanlarının üretiminin kolaylığı açısından ilgi görmektedir(Li M., 2007). Silisyum tabanlı devre elemanları optoelektronik entegre devrelerde, mikroelettronik teknolojide, photovoltaik entegre devrelerde tercih edilmektedir.

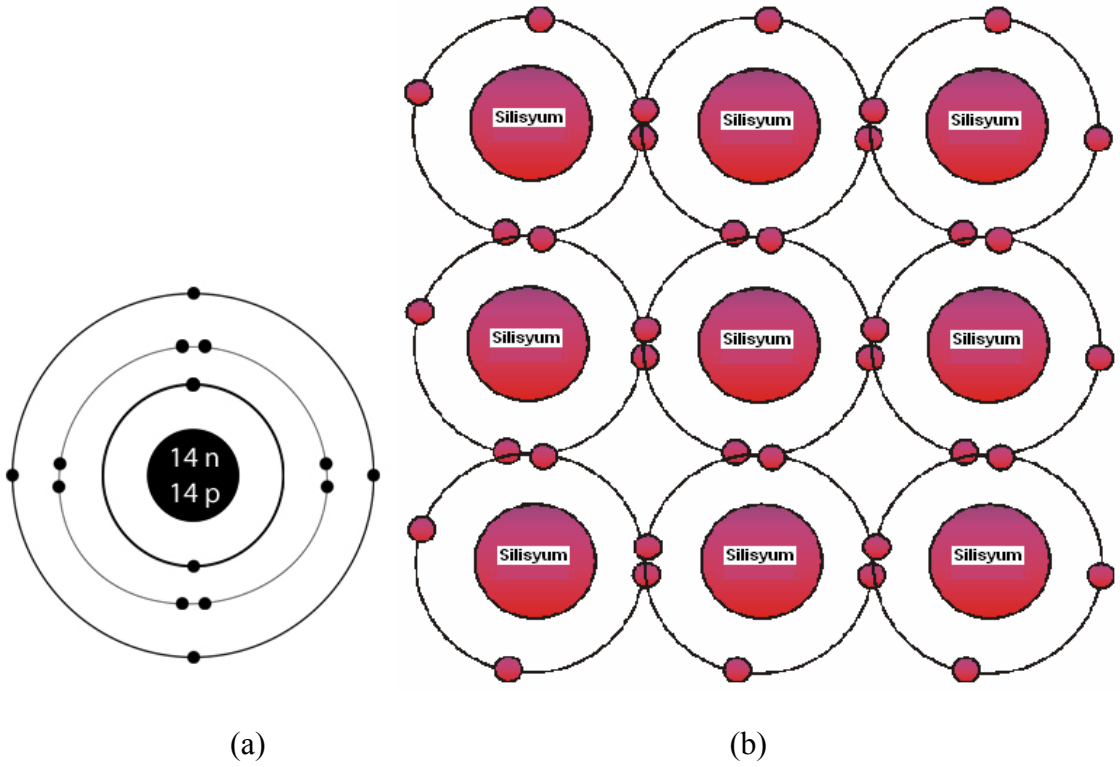
Geçiş metalleri ile silisyumun katı faz reaksiyonu pratik uygulamaları nedeniyle ilgi çekmiştir. Geçiş metalleri silisyum yarıiletkeni ile birleşerek metalik özellik gösteren metal silisidleri oluştururlar. Bu metalik silisidlerin tümleşik devrelerde iç bağlantı, kapı (gate) metalleri ve omik kontak gibi kullanım alanları mevcuttur(Benouattas N., 1999). Silisid-silisyum arayüzeyi silisyumun yüzeyinden daha düşük mesafede olduğu için kirlilikten etkilenmez, iyi mekanik adhezyon özelliği sergiler ve oda sıcaklığında kararlı elektriksel özellik gösterirler (Benouattas N., 1999). Schottky bariyer yüksekliği ve idealite faktörü tavlama sıcaklığı ile değişiklik gösterir (Benouattas N., 1999). Bu geçiş metallerinden bazıları Silisyum yarıiletkeni ile birleşerek yeni bir sınıf olan yarıiletken silisidleri oluştururlar. Bu yarıiletken silisidlerin ($CrSi_2$, $ReSi_2$, $\beta-FeSi_2$ gibi) yasak enerji band aralıkları $0.1 \sim 0.9 eV$ arasındadır(Kim K. H., 1998). Yarıiletken silisidler optoelektronik, termoelektronik ve fotovoltaik aygıtlarda (ışık kaynağı, infrared dedektör, elektro-optik bağlantı gibi) uygulama potansiyeli ile dikkat çekmiştir.

Bu çalışmada geçiş metallerinden Cr, p ve n-tipi Si yarıiletken altlıklar üzerine elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile Cr/Si Schottky kontaklar üretildi ve elektriksel özelliklerindeki değişim sıcaklığa bağlı olarak incelendi. Üretilen numunelerin (Cr/Si eklemlerin) fotovoltatik özellikleri oda sıcaklığındaki 100mW/cm^2 aydınlatma altında I-V ölçümlerinden, eklemlerin elektriksel özellikleri ve diyot parametreleri ise sıcaklığa bağlı karanlıkta I-V ve C-V ölçümleriyle belirlendi. Çalışmanın son aşamasında Cr/Si eklemler farklı sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutuldu ve bu işlemin diyotun elektriksel ve fotovoltatik özelliklerine etkisi incelendi.

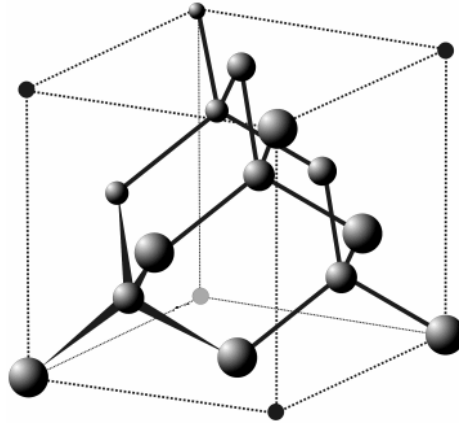
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Silisyumun yapısal özellikleri

Katıhal fiziğinde önemli bir yere sahip olan silisyum, periyodik tablonun 4. grubunda yer alır ve elektron dağılımı şu şekildedir: ${}_{14}\text{Si}:1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Silisyum atomunun valans kabuğuna dört elektron ($3s^2 3p^2$) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her Si atomunun 4 valans elektronları ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçer. Silisyum elmas yapı şeklinde kristalleşir ve bu yapıda her bir Si atomu 4 komşu Si atomu ile kovalent bağ yapar (Şekil 2.1). Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi elmas yapıda (000) ve $\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right)$ konumlarında iki atom bulunmaktadır. Elmas yapının ilkel hücresinde tek atom değil iki atom bulunur ve birim hücresinde de 8 atom mevcuttur.



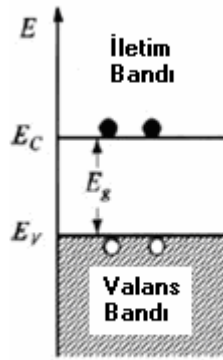
Şekil 2.1 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı



Şekil 2.2 Elmas yapı

Elmas yapının birim hücresinde hacim köşegeninin dörtte biri kadar birbirinin içine girmiş silisyuma ait iki tane yüzey merkezli kübik örgü (fcc yapı) bulunmaktadır.

Katkısız (asal) yarıiletken Silisyum kristalin iletkenliğini sadece asal iletim elektronları ve boşlukları sağlar. Asal yarıiletkenler için enerji band diyagramı Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Asal yarıiletkenin enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)

Daha iyi iletkenliğe sahip yarıiletken elde etmek için bazı katkı atomları yarıiletkene katkılanır ve bu şekilde n ve p-tipi yarıiletkenler elde edilir.

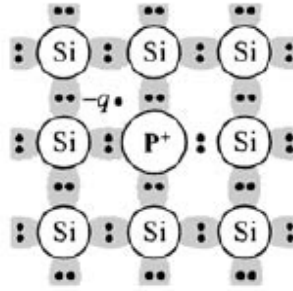
Si atomuna, periyodik cetvelin 5. grup elementlerinden biri (As, Sb, P, N gibi) katkılандığında n-tipi Si elde edilir. 5. grup elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektronu bulunur. Bu elektronların dördü Si atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur, geriye kalan tek elektron ise katkı atomuna zayıf bağlıdır ve çok çabuk serbest kalır(Şekil 2.4). Bu durumda katkı atomu Si kristaline örgü içinde serbestçe hareket edebilen bir elektron vermiş olur. Katkı atomu elektron verdiği için donör; bu şekilde katkılanan yarıiletken de n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.5’de de gösterildiği gibi donör atomları yarıiletken enerji band diyagramında iletim bandının hemen altına yerleşir. Donör

enerji seviyesi E_d

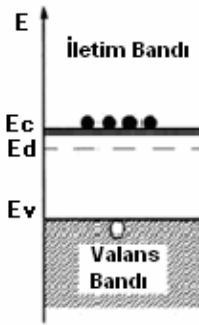
$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada, ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, m_e elektronun kütlesi, m_e^* elektronun etkin kütlesi, E_H hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisini ifade eder (13.6 eV).

n-tipi yarıiletkende donörün iyonlaşması ile valans bandında delik oluşmadığı için donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu delik konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte elektronlar baskın olacaktır. Yani, n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır ve azınlık yük taşıyıcıları ise deliklerdir.



Şekil 2.4 n-tipi Si (donör katkılı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)



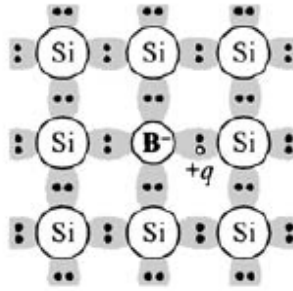
Şekil 2.5 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)

Si atomuna, periyodik cetvelin 3. grup elementlerinden biri (In, Ga, Al, B gibi) katkılındığında p-tipi Si elde edilir. 3. grup elementlerinin son yörüngelerinde üç valans elektronu bulunur. Bu üç valans elektronu Si atomunun dört valans elektronunun üçü ile kovalent bağ yapar ve Si atomunun bir elektronu bağ yapamaz. Bu elektronun karşısında delik olur. Bu delik diğer Si = Si bağlarından bir elektronun bu boşluğa yerleşmesiyle

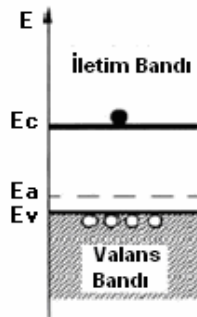
doldurulabilir. Bu defada elektronun kopmuş olduğu yerde bir delik meydana gelir, bu boşluk da başka komşu atomlardan kopan elektronlarla doldurulur. Bunun neticesinde valans bandında delik oluşmuş olur ve bu delik örgü içerisinde bağımsız olarak hareket eder (Şekil 2.6). Yani katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olur. Katkı atomu elektron aldığı için akseptör olarak, akseptör atomları ile katılanmış yarıiletken de p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.7’de gösterildiği akseptör atomları yarıiletken enerji band diyagramında valans bandının hemen üzerine yerleşir. Akseptör enerji seviyesi E_a ;

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h} \right) E_H$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada m_h deliklerin kütlesi, m_h^* ise deliklerin etkin kütlesini ifade eder.



Şekil 2.6 p-tipi Si (akseptör katkı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)



Şekil 2.7 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)

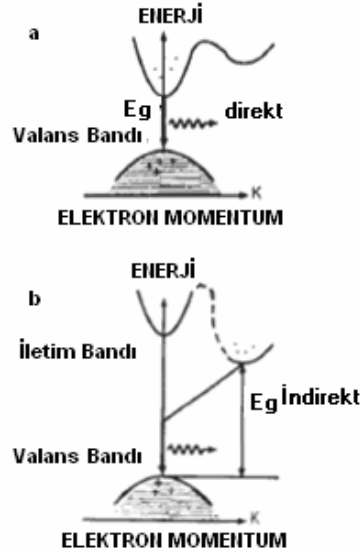
p-tipi yarıiletkende akseptör atomunun valans bandından bir elektron koparmasından dolayı iletim bandında bir elektron oluşmadığı için, akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarıiletkendeki delik konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte delikler baskın rol oynayacaklardır. Yani p-tipi yarıiletkende

çoğunluk yük taşıyıcıları delikler olup, azınlık yük taşıyıcıları da elektronlardır.

Yarıiletken üzerine düşen bir fotonun yarıiletken tarafından soğurularak, valans bandındaki bir elektronun yasak bandı aşarak iletim bandına geçmesi iki şekilde olabilir:

1. Direkt geçişler
2. İndirekt geçişler

Eğer yarıiletkenin band yapısı Şekil 2.8 (a)'da gösterildiği gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı aynı doğrultuda ($\vec{k} = 0$) ise böyle yarıiletkenlere direkt band geçişli yarıiletkenler denir. Bu; enerji-momentum uzayında dalga vektörü değişiminin sıfır olması anlamına gelir ($\Delta\vec{k} = 0$). Yani, direkt bandlı yarıiletkenlerde elektron valans bandından iletim bandına dalga vektöründe veya momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan geçer.



Şekil 2.8 (a) direkt ve (b) indirekt bandlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992)

İndirekt geçişli yarıiletkenlerde Şekil 2.8 (b)'de görüldüğü gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı k-momentum uzayında farklı değerlerdedir. Bu da, enerji-momentum uzayında dalga vektöründeki değişimin sıfırdan farklı olması anlamına gelir ($\Delta\vec{k} \neq 0$). Bu geçişte enerji korunur fakat soğurulan fotonun momentumunun, valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için yeterli olmadığından dolayı ortamdaki bir fononun (kristaldeki örgü atomlarının titreşim kuantı) soğurulması veya ortama yayılması gerekmektedir. Çizelge 2.1'de de ifade edildiği gibi Si kristali indirekt geçişli bir

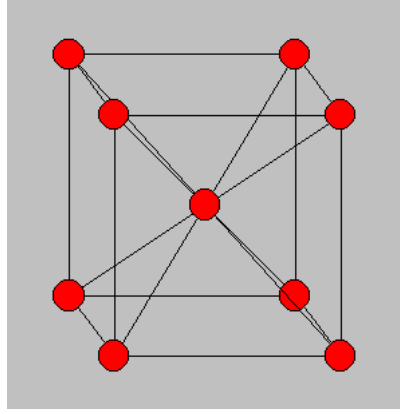
yarıiletkendir ve yasak enerji aralığı 1.12 eV'dur.

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkenin çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007)

Özellikler	Si
Atom yoğunluğu(cm^{-3})	5.02×10^{22}
Atomik ağırlık	28.09
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluk (g / cm^3)	2.329
Örgü sabiti($^{\circ}A$)	5.43102
Dielektrik sabiti	11.9
Elektron alınganlığı $\chi(V)$	4.05
Yasak band aralığı (eV)	1.12 (indirekt)
İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_C (cm^{-3})$	2.8×10^{19}
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_V (cm^{-3})$	2.65×10^{19}
Asal taşıyıcı konsantrasyonu $n_i (cm^{-3})$	9.65×10^9
Elektron etkin kütlesi (m^* / m_e)	$m_l^* = 0.98$ $m_t^* = 0.19$
Deliklerin etkin kütlesi (m^* / m_h)	$m_{lh}^* = 0.16$ $m_{hh}^* = 0.49$
Elektronların sürüklenme mobilitesi $\mu_n (cm^2 / V - s)$	1,450
Deliklerin sürüklenme mobilitesi $\mu_p (cm^2 / V - s)$	500
Doyum hızı (cm / s)	1×10^7
Bozulma alanı (V / cm)	$2.5 - 8 \times 10^5$
Azınlık taşıyıcı ömrü (s)	$\approx 10^{-3}$
Kırılma indisi	3.42
Optik-fonon enerjisi (eV)	0.063
Erime noktası ($^{\circ}C$)	1414
Isısal iletkenlik $W / cm - K$)	1.56
Isısal yayılma (cm^2 / s)	0.9
Isı kapasitesi ($J / mol - ^{\circ}C$)	20.07

2.2 Krom Elementinin Yapısal Özellikleri

Krom elementi periyodik tabloda 6. grupta yeralan bir metaldir. Elektron dağılımı: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$ şeklindedir. Kromun kristal yapısı cisim merkezli kübik yapıdır (Şekil 2.9). Bu metalinin bazı parametreleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.



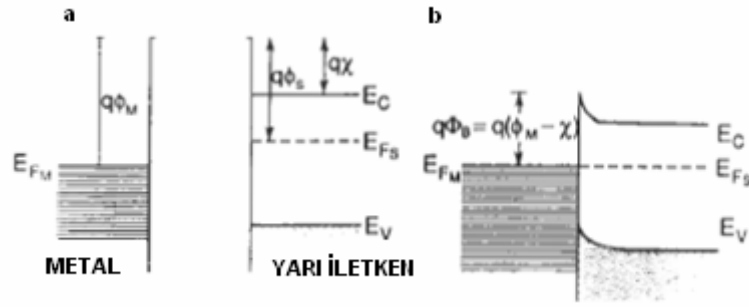
Şekil 2.9 cisim merkezli kübik yapı (bcc yapı)

Çizelge 2.2 Krom metalinin parametreleri

Özellikler	Cr
Atom numarası	24
Atomik ağırlığı	51.9961
Elektron dağılımı	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$
Erime noktası ($^{\circ}C$)	1857
Kaynama noktası ($^{\circ}C$)	2672
Elektriksel iletkenlik ($cm^{-1}\Omega^{-1}$)	7.74×10^4
Isısal iletkenlik (W/cmK)	0.937
Elektron iş fonksiyonu (eV)	4.5

2.3 Metal-Yarıiletken Kontaklar

Mikroelektronik aygıtların çoğunluğunun çalışma prensipleri metal-yarıiletken ve p-tipi yarıiletken--n-tipi yarıiletken (p-n eklemi) kontakların fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Bu tür kontakların sınır bölgesinde potansiyel engeller meydana gelmektedir. Potansiyel engellerin oluşması, metal-yarıiletken arası yük taşıyıcılarının konsantrasyonlarının yeniden dağılmasına bağlıdır. Bu tür kontakların elektriksel özellikleri dışardan uygulanan gerilimin değeri ve yönü ile değişmektedir. Kontaklar lineer olmayan akım-gerilim karakteristiği gösterebilir. Kontakların lineer olmayan özellikleri, elektrik akımının doğrultulması, dönüşümü, yükseltilmesi (amplifikasyonu) veya elektrik sinyallerinin jenerasyonu için kullanılabilir. Şekil 2.10'da metal- yarıiletken kontağın enerji band diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.10 (a) Birbirinden izole metal ve n-tipi yarıiletkenin band diyagramı. (b) metal-yarıiletken kontağın band diyagramı (Ohring M., 1992)

Metal-yarıiletken kontakları, Schottky kontaklar ve omik kontaklar diye iki sınıfa ayırabiliriz.

2.3.1 Schottky Kontaklar

Schottky bariyer (MS) diyodlar tek yönlü hızlı devre elemanları olarak kullanılmaktadır. Mikrodalga uygulamalarındaki ve doğru akımdaki önemlerinden dolayı karmaşık yarıiletken devrelerden ziyade metal-yarıiletken kontaklar üzerinde çokça çalışılmıştır. Özellikle MS diyotlar fotodedektör, güneş pili, MESFET'lerin kapı elektrodu olarak kullanılırlar. En önemli kullanımı ise, ağır katkılı yarıiletken metal kontakla bir omik kontak oluşturulması her yarıiletken devre elemanında, elemanın içine veya dışına akım geçmesi için gereklidir.

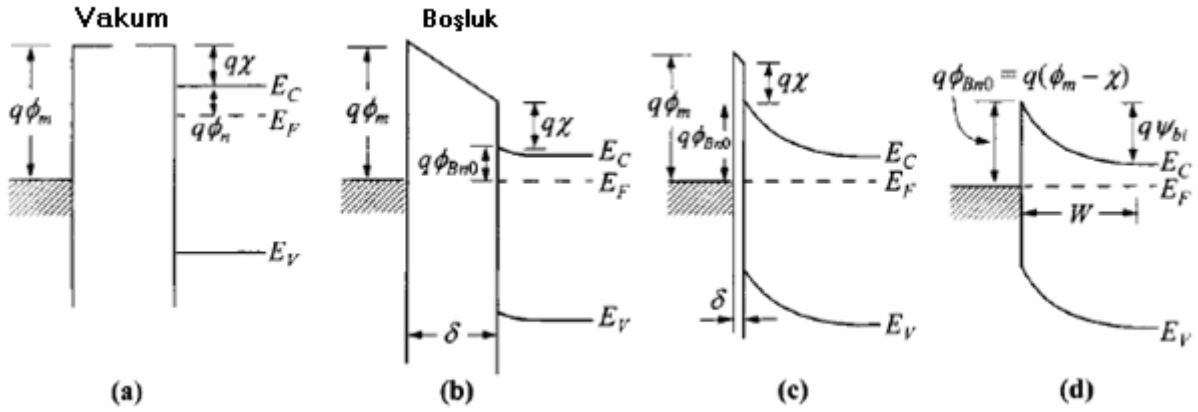
Bir metal bir yarıiletkenle kontak yapıldığında, metal-yarıiletken arayüzeyde bir bariyer oluşur. Bu bariyer kontağın kapasitans davranışından dolayı akım iletimini kontrol eder.

Kontağın arayüzeyindeki bariyeri anlayabilmek için bazı parametreleri tanımlamakta fayda var: İş fonksiyonu, vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve metal için $q\phi_m$ olarak gösterilir ve $q(\chi - \phi_n)$ değerine eşittir. Burada χ elektron afinitesidir (alınanlığı) ve iletim bandının tabanı (E_C) ile vakum seviyesi arasındaki farka eşittir, $q\phi_n$ ise iletim bandının tabanı (E_C) ile Fermi seviyesi (E_F) arasındaki enerji farkına eşittir.

Metal-yarıiletken arasındaki mesafedeki (δ) azalış elektrik alanının ($E = \frac{V}{x}$ olduğundan dolayı)

artışına öncülük eder ve bundan dolayı negatif yükler metal yüzeyde toplanır. Bu yükler yarıiletkenin fakirleşme bölgesindeki pozitif yükler ile denkleşir. Bundan dolayı ilgili bandlar Şekil 2.11c'de görüldüğü gibi bükülür ve ideal durum için bariyer yüksekliği (ϕ_{bno}) basitçe metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron afinitesi arasındaki farka eşit olur. $q\phi_m$

metalle değişir ve yüzey kirliliğine çok duyarlıdır. Örneğin temiz yüzeyli krom (Cr) için $q\phi_m$; 4.65 eV'ye eşittir ve Si için $q\chi$; 4.05 eV'ye eşittir(Sze M. S., 2007).



Şekil 2.11 metal-yarıiletken kontakların enerji-band diyagramları. Metal ve yarıiletken (a) birbirinden ayrı iken, (b) bir sistemde birleşmiş halleri. Kontakt mesafesi (δ) (c) azalmış durumda iken, (d) sıfır olduğu durum. (Sze M. S., 2007)

Deneyisel bariyer yüksekliği değeri, teorik (ideal) bariyer yüksekliği değerinden sapabilir. Bu sapmanın sebeplerini şöyle sınıflandırabiliriz:

- i) kaçınılmaz bir arayüzey tabakası
- ii) arayüzey durumların varlığı

Bir metal, bir yarıiletken (burada n-tipi olarak düşünülmüştür) üzerine buharlaştırılırsa yarıiletken ile kontak başarılmış olur ve yarıiletkenin ilgili bandları (iletim ve valans bandları) yüzeyde metalin Fermi enerjisiyle (E_F) ile belirgin bir enerji ilişkisine girer. Bu ilişki kaba bir yaklaşımı ile ($\rho = qN_D$ için $x < W_D$ ve $\rho = 0$ için $x > W_D$ burada W_D fakirleşme bölgesinin genişliğidir), fakirleşme bölgesinin genişliğinin değişimini, fakirleşme bölgesinin kapasitansı (veya yükü) ve uygulanan besleme voltajının bir fonksiyonu olan elektrik alan kuvvetinin altında sabitlenir.

$$W_D = \left[\frac{2\epsilon_s}{qN_D} \left(\phi_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

Burada N_D donör yoğunluğu, ϵ_s Si'un elektriksel geçirgenliği (permitivite), V uygulanan besleme voltajı, ϕ_{bi} oluşum voltajı (built-in voltage), k Boltzman sabiti, T sıcaklık, q temel yüküdür. Eğer N_D fakirleşme bölgesinde sabit ise değeri $1/C_D^2$ ye V grafiğinin eğiminden elde

edilebilir (yüksek frekanstaki ölçümler için). Ufak bir hesaplamadan sonra analitik açıklama yapılabilir.

$$Q_{SC} = qN_D W_D \quad (2.2)$$

$$C_D = \frac{\varepsilon_S A}{W_D} \quad (2.3)$$

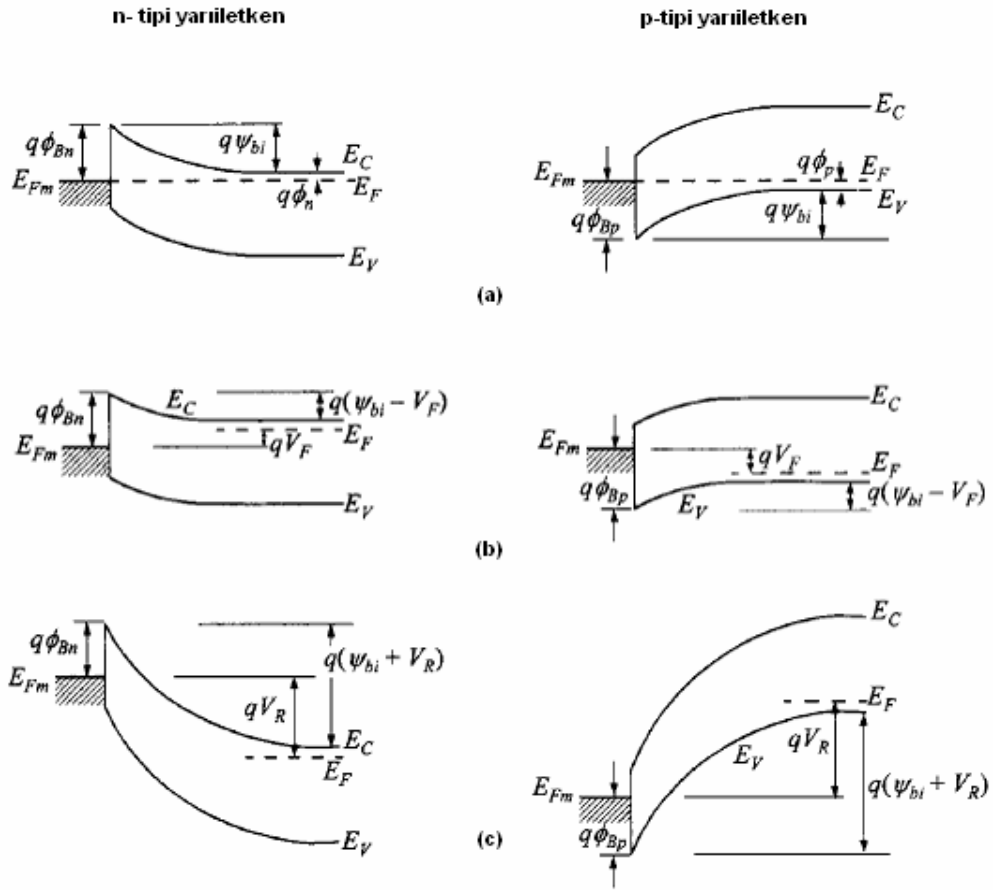
$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2 \left[\phi_{bi} - V - kT/q \right]}{qA^2 \varepsilon_S N_D} \quad (2.4)$$

$$N_D = \frac{2}{qA^2 \varepsilon_S \left(\text{eğim} \left(\frac{1}{C_D^2} / dV \right) \right)} \quad (2.5)$$

Burada A elektrotun alanıdır.

Bunun yanında kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri derin safsızlık seviyelerinin ve arayüzey durumların araştırılmasında da kullanılabilir.

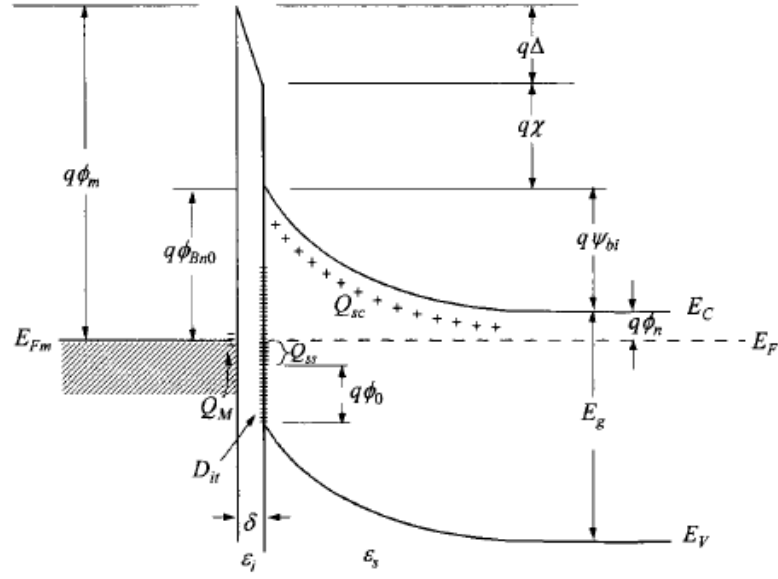
Şekil 2.12a ve 2.12b gösterildiği gibi tüm sık donörler iyonize olmuştur (E_F üzerindeki için) derin donörler yani arayüzey yakınındaki safsızlıklar gibi (elektronlarla dolu olduğunda nötraldir, boş olduğunda da pozitif yüklüdür) iyonize olur ve daha yüksek etkili katkı (doping) konsantrasyonuna yol verir. Bu durum bariyer yüksekliğinde bir Δ miktarı kadar artışa sebep olabilir. C-V ölçümlerinde DC besleme üzerine AC sinyal bindirildiği unutulmamalıdır. Kapasitansın frekansa bağımlılığı vardır ve derin safsızlıklar sadece düşük frekans kiplerini yakalayabilir, diğer bir deyişle bunlar azınlık taşıyıcısı gibi davranırlar. Bununla ilgili olarak yüklerin etkisi (ya yüzey durum yükleri ya da derin donör yükleri ya da her ikisi olabilir) değişik kipli frekansların (kHz-MHz) altında C-V analizlerinden arayüzey durumlar veya derin seviyedeki safsızlık elde edilebilir.



Şekil 2.12 Metal-n-tipi (solda) ve p-tipi (sağda) yarıiletken kontakların farklı beslemeler altındaki enerji-band diyagramları. (a) Termal dengedeki durum, (b) doğru besleme, (c) ters besleme. (Sze M. S., 2007)

2.3.1.1 Arayüzey Durumlar

Metal-yarıiletken sistemlerin bariyer yüksekliği, iş fonksiyonları ve arayüzey durumlarla ifade edilir. Metal-yarıiletken yapının elektriksel özelliğinde iki önemli faktör kritik rol oynar; bunlardan biri $q\phi_0$ (arayüzey durumların nötral seviyesi) ve diğeri ise $q\phi_{bno}$ (bariyer yüksekliği DC akıma katkısı elektronlar için baskın gelir) dir. Eğer E_F $q\phi_0$ seviyesinin altında ise, $q\phi_0$ akseptör safsızlık seviyesi gibi davranır (boş olduğunda nötraldir, dolu olduğunda negatif yüklüdür). Eğer E_F bu seviyenin üzerinde ise, donör tip gibi davranır (elektronlarla dolu olduğunda nötral, boş olduğunda pozitif yüklüdür). Şekil 2.13’de arayüzey tabakasına sahip MS yapının enerji band diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Atomik mesafeli arayüzey tabakasına sahip metal-n-tipi yarıiletken kontağın detaylı enerji-band diyagramı (Sze M. S., 2007)

Yarıiletkenin Fermi seviyesinin E_F , $q\phi_0$ seviyesinin üzerinde olduğu bir durumu düşünelim; arayüzey tuzak yük yoğunluğu (akseptör benzeri) negatif olabilir ve $q\phi_0$ ile E_V arasında bir yere yerleşir ve şu şekilde ifade edilir.

$$Q_{ss} = -qN_{ss} [E_g - q(\phi_0 + \phi_{bn0})] \quad (2.6)$$

Metal elektrot üzerine besleme uygulandığında, metal-yarıiletken arayüzeyde (Q_{ss}) ve fakirleşme tabakasında sınırında (Q_D) eşit miktarda ve zıt yükler uyarılır. Bundan dolayı metal elektrot üzerindeki yük miktarı şu şekilde ifade edilir.

$$Q_m = -(Q_{ss} + Q_D) \quad (2.7)$$

Arayüzey üzerine düşen potansiyel (Δ), Gauss kanunundan elde edilebilir:

$$\Delta = -\frac{Q_m \delta}{\epsilon_i} \quad (2.8)$$

Burada ϵ_i arayüzeyel tabakanın elektriksel geçirgenliği (permittivite) ve δ kalınlığıdır. Δ şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta = \phi_m - (\chi + \phi_{bn0}) \quad (2.9)$$

$$\phi_m - (\chi + \phi_{bn0}) = \frac{\delta}{\epsilon_i} \sqrt{2q\epsilon_s N_D \left(\phi_{bn0} - \phi_n - \frac{kT}{q} \right)} - \frac{qD_{it}\delta}{\epsilon_i} (E_g - q\phi_0 - q\phi_{bn0}) \quad (2.10)$$

Değerleri ifade edersek

$$C_1 \equiv \frac{2q\varepsilon_s N_D \delta^2}{\varepsilon_i^2} \quad (2.11)$$

$$C_2 \equiv \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i + q^2 D_{it} \delta} \quad (2.12)$$

$\sqrt{\phi_{bn0} - \phi_n - \frac{kT}{q}}$ teriminin ihmalı ile ilişki şu hali alır:

$$\phi_{bn0} = C_2(\phi_m - \chi) + (1 - C_2) \left(\frac{E_g}{q} - \phi_0 \right) \equiv C_2 \phi_m + C_3 \quad (2.13)$$

ϕ_m 'in C_2 ve C_3 değişimi bilinerek arayüzey özellikleri ifade edilebilir.

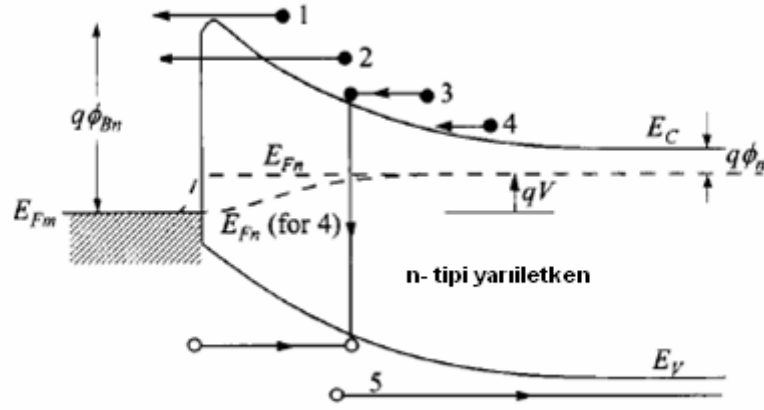
$$\phi_0 = \frac{E_g}{q} - \frac{C_2 \chi + C_3}{1 - C_2} \quad (2.14)$$

$$D_{it} = \frac{(1 - C_2) \delta}{C_2 q^2 \delta} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki formül ile arayüzeydeki tuzak sayısı (D_{it}) ifade edilebilir.

2.3.1.2 İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken yapı arasında taşıyıcıların iletimi çoğunluk taşıyıcıları nedeniyle (n-tipi Si için elektronlardır) gerçekleşir ve yük taşıyıcıların akımı bilinen mekanizmalarla farklı ilişkilendirilmiştir ve Şekil 2.14'de şematik olarak verilmiştir. Metal-yarıiletken yapı için doğru besleme altında taşıyıcı iletim prosesleri numaralarla ifade edilmiştir. Temel mekanizmalarda yani idealite faktörünün 1 olduğu durumlarda termiyonik emisyon ve difüzyon mekanizmaları etkisi altındadır, idealite faktörünün 1'den saptığı durumlarda diğer mekanizmalar (tünelleme, rekombinasyon vb.) etki gösterir.



Şekil 2.14 doğru gerilim altında beş temel iletim prosesi. (1) Termoiyonik emisyon. (2) Tünelleme. (3) Rekombinasyon (yeniden birleşme). (4) Elektronların difüzyonu. (5) Deliklerin difüzyonu. (Sze M. S., 2007)

Oda sıcaklığında orta dereceli katkılı ($N_D < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) kristal yarıiletkenlerde hakim olan mekanizma (1), (2) veya (1) ve (2)'nin kombinasyonudur.

Termoiyonik Emisyon Teorisi

Termoiyonik emisyon ilk olarak Bethe tarafından aşağıdaki kabullerle tanımlanmıştır:

- i) bariyer yüksekliği kT değerinden büyük olmalı
- ii) termal denge sağlanmış olmalı
- iii) akım akışı dengeyi bozmamalı

Eğer sadece bu mekanizma baskınsa Fermi seviyesi fakirleşme bölgesinde sabit olmalı ve metal bölgesindekiyle çakışmalıdır. Bundan dolayı akım sadece bariyer yüksekliği ile sınırlandırılır. Yarıiletkendен metale doğru olan akımın değeri

$$I_{s \rightarrow m} = A \int_{E_{Fn} + q\phi_{Bn}}^{\infty} q v_x dn \quad (2.16)$$

Burada $E_{Fn} + q\phi_{Bn}$ bariyeri aşmak için gerekli olan enerjidir, v_x taşıyıcı hızı, dn elektron yoğunluğudur ve şu şekilde ifade edilir.

$$dn = N(E)f(E)dE \approx \frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left(-\frac{E - E_c + q\phi_n}{kT}\right) dE \quad (2.17)$$

$q(\phi_{bi} - V)$ potansiyelini aşmak için gereken minimum hız

$$\frac{1}{2} m^* v_{0x}^2 = q(\phi_{bi} - V) \quad (2.18)$$

olmalıdır.

$$I_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.19)$$

$$A^* = \frac{4\pi q A m^* k^2}{h^3} \quad (2.20)$$

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.21)$$

Net elektron akımı

$$I_n = I_{s \rightarrow m} + I_{m \rightarrow s}$$

$$I_n = I_0 \left(\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.22)$$

$$I_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right)$$

olmalıdır.

Eğer akım mekanizmamız termoiyonik emisyon ise $\ln(I_0/T^2)$ 'ye (q/kT) grafiğinin eğimi bize idealite faktörü asal değerine eşit olan metal-yarıiletken eklem arasındaki bariyeri aşması için gereken enerjiyi yani aktivasyon enerjisini verir.

Difüzyon Mekanizması

(2) nolu mekanizma için aşağıda belirtilen şartların var olduğunu düşünelim:

i) $\phi_{bn} \gg kT$

ii) fakirleşme bölgesindeki elektron çarpışmaları hesaba katılır.

iii) sınırlarda ($x = 0$ and $x = W_D$) taşıyıcı konsantrasyonu etkilenmez.

iv) safsızlık konsantrasyonu çok yüksek değildir.

Fakirleşme bölgesindeki akım her iki lokal alan ve konsantrasyon gradyentiyle oluşur ve bundan dolayı aşağıdaki gibi (J_n) ifade edilir.

$$J_n = q \left(n \mu \varepsilon + \Delta n \frac{dn}{dx} \right) \quad (2.23)$$

$$J_n = q \Delta n \left(\frac{n}{kT} \frac{dE_c}{dx} + \frac{dn}{dx} \right) \quad (2.24)$$

$$J_n = \frac{q^2 D_n N_C}{kT} \sqrt{\frac{2q N_D (\phi_{bi} - V)}{\varepsilon_s}} \exp \left(-\frac{q \phi_{bn}}{kT} \right) \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.25)$$

$$J_n \cong q \mu_n N_C E_M \exp \left(-\frac{q \phi_{bn}}{kT} \right) \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.26)$$

$$J_n = J_D \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.27)$$

Difüzyon mekanizmasından meydana gelen akım, ortam sıcaklığına karşı az duyarlıdır ve termoiyonik emisyon mekanizmasından elde edilen saturasyon akımına kıyasla beslemeye bağlıdır.

Bunlardan ayrı olarak, bir başka akım mekanizması, incelenen yapılar için var olabilir. Bu mekanizmalar idealite faktörü, aktivasyon enerjisi, vs. gibi karakterlerin belirlenmesiyle birbirlerinden ayrılabilirler. η , log-lineer eğrinin eğiminden hesaplanabilir.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q V_F}{\eta k T} \right) - 1 \right] \quad (2.28)$$

Bir başka deyişle η asıl akım mekanizmasının belirleyicisidir. Termoiyonik emisyondan dolayı I_0 şartın sebebiyle oda sıcaklığında normal derecede katkılı yarıiletken için η bire yakındır. Diğer taraftan, yüksek katkı ve/veya düşük sıcaklıkta tünelleme akım mekanizmasının I_0 ve η değerlerini artırdığı gözlenmiştir.

Tünelleme Mekanizması

İlk olguyla başlayalım: tünelleme mekanizması doğru ve ters besleme şartları altında η değerinin 1'den sapmasına sebep olur:

Doğru besleme uygulandığında tünelleme akımı:

$$\begin{aligned} J_{tunneling} &= A A^{**} T \pi \frac{\exp(-q(\phi_{bn} - V_F)/E_{00})}{c_1 k \sin(\pi c_1 k T)} [1 - \exp(-c_1 q V_F)] \\ &\approx A^{**} T \pi \frac{\exp(-q(\phi_{bn} - V_F)/E_{00})}{c_1 k \sin(\pi c_1 k T)} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Burada $c_1 \equiv \frac{1}{2E_{00}} \log \left[\frac{4(\phi_{bn} - V_F)}{-\phi_n} \right]$ ve $E_{00} \equiv \frac{q\hbar}{2} \sqrt{\frac{N}{m^* \epsilon_s}}$ 'dır. Bu durumda $kT \ll E_{00}$ ve akım sıcaklığa çok zayıf bağlıdır. Benzer olarak ters beslemede:

$$I_{tunneling} = AA^{**} \left(\frac{E_{00}}{k} \right)^2 \left(\frac{\phi_{bn} + V_R}{\phi_{bn}} \right) \exp \left[- \frac{2q\phi_{bn}^{3/2}}{3E_{00} \sqrt{\phi_{bn} + V_R}} \right] \quad (2.30)$$

Bu analitik açıklamalar omik karakteristik için önemlidir.

Jenerasyon-Rekombinasyon Mekanizması

Diğer taraftan jenerasyon rekombinasyonu akım mekanizması da η değerinin 1'den sapmasına yol açar. Akım sıcaklığa bağlıdır ve aktivasyon enerjisi yasak band aralığının yarısına eşittir (kristal Si için $E_G = 1.12 \text{ eV}$).

2.3.1.3 Akım-Voltaj Ölçümlerinden Bariyer Yüksekliğinin Elde Edilmesi

10^{17} cm^{-3} katkı yoğunluğuna sahip yarıiletkenin doğru besleme yönündeki I-V karakteristiği,

$$V > \frac{3kT}{q} \text{ durumlarından}$$

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{\eta kT} \right) \quad (2.31)$$

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{q\phi_{bn0}}{kT} \right) \quad (2.32)$$

ifadesiyle verilir.

Diğer taraftan ters yön için

$$I_R \approx I_0 \approx AA^{**} T^2 \exp \left[- \frac{q}{kT} \left(\phi_{bn0} - \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}} \right) \right] \quad (2.33)$$

Burada

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s} \left(V_R + \phi_{bi} + \frac{kT}{q} \right)} \quad (2.34)$$

değerindedir.

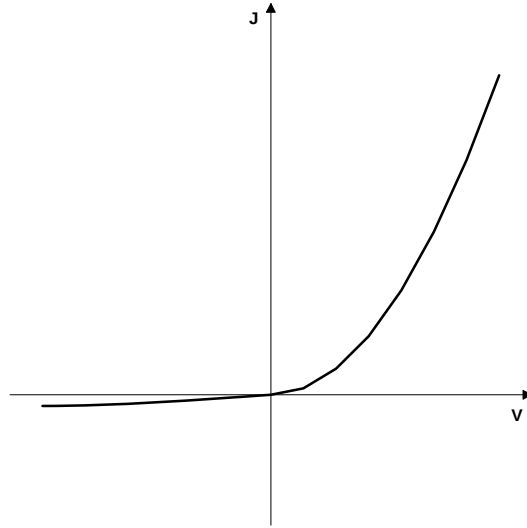
$\ln(I_F)$ 'nin V_F 'ye göre grafiğinden,

$$\eta = \frac{q}{kTA} \quad (2.35)$$

formülü ile bulunur. Burada $A = \left(\ln I / I_0 \right)$ 'dir. Eğrinin sıfır besleme voltajına ekstrapolasyonu saturasyon akımını (I_0) verir. Buradan bariyer yüksekliği

$$\phi_{bn0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^{**}T^2}{I_0} \right) \quad (2.36)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada A filmin alanıdır. ϕ_{bn0} 'ın seçilen A^{**} değerine çok az duyarlı olduğu bilinmektedir. A^{**} , %100 yanlış seçtiğimizde bile ϕ_{bn0} değeri sadece 18 meV hatalı bulunur. Bir çok durumda A^{**} değeri $120 \text{ A/cm}^{-2} \text{ K}^2$ olarak alınır (Sze M. S., 2007).



Şekil 2.15 Schottky diyotlar için akım-gerilim grafiği (Caferov T., 2000)

η değerinin doğru tayin edilmesi çok önemlidir, çünkü doğru değeri bize asıl akım mekanizması hakkında bilgi verir. Bunun yanında $\ln I_0$ 'ın $1/T$ 'ye göre grafiği, çeşitli T değerlerindeki I-V ölçümlerinden elde edilir ve aktivasyon enerjisinin E_a belirlenmesine şans tanır ki bu da akım mekanizmasının doğrulanmasında göz önünde bulundurulur.

Sonuç olarak $\eta \log(I)$ 'ya V eğrisinden Missous ve Rhoderick'in önerdiği metodla kontrol

edilebilir (Sze M. S., 2007). Bu metod, seri direncin R_s büyük veya bariyer yüksekliğinin düşük olduğu durumlarda uygulanabilir. Bu metotta akım şu şekilde ifade edilir:

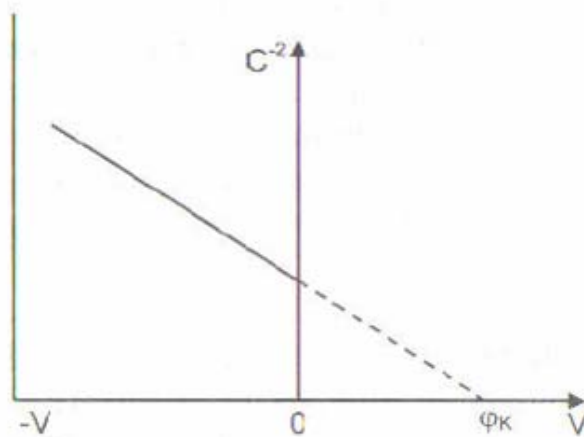
$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right) \quad (2.37)$$

Doğru ve ters yönde de $\ln\left(\frac{I}{1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)}\right)$ 'ın V'ye olan grafiğinin lineer bölgesinden η elde

edilebilir. ϕ_{bn0} belirlenmesi bir öncekiyle aynıdır.

2.3.1.4 Kapasitans-Gerilim Ölçümlerinden Bariyer Yüksekliğinin Elde Edilmesi

Bariyer yüksekliği yüksek kipli frekansta (kristal Si için tipik olarak 1MHz) C-V ölçümlerinden de elde edilebilir. Bunun için bir DC beslemeye küçük bir AC voltaj kipinin üst üste bindirilir. Burada metal elektrodun kapısındaki yükler eşit miktardaki fakat zıt yükleri yarıiletken bölgesinde uyarır(indükler). Yani $\delta Q_m = -\delta Q_D$ olur. Eğer frekans kipleri yeterince yüksek ise arayüzeydeki azınlık yüklerinden yanıt gelmez. Dolayısıyla, C_D ve V_R arasındaki ilişki daha önce verildiği gibidir. $1/C_D^2$ 'nin V_R 'ye göre grafiğinin lineer bölgesinden sabit (değişmeyen) katkı miktarı N_D miktarı elde edilebilir. Ayrıca voltaj eksenini kestiği yer oluşum potansiyelini verir ve buradan da bariyer yüksekliğini belirlenebilir.



Şekil 2.16 Schottky diyotun kapasitans-ters gerilim grafiği (Caferov T., 2000)

$$\phi_{bn0} = \psi_{bi} + \frac{kT}{q} + \phi_n \quad (2.38)$$

$$\text{Burada } \phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (2.39)$$

ve $N_C \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ değerindedir ve asal taşıyıcı konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar, çoğunluk yük taşıyıcılarına bağlıdır ve azınlık yük taşıyıcılarının etkisi genellikle ihmal edilir. Buna rağmen bazı durumlarda hesaba katılmayan bu durum yüksek düz beslemede elektronların metal elektrottan p-tipi kristal silikona enjeksiyonu sonucu ölçme (inceleme) tekniklerinde (akım-gerilim, admittans, kondüktans ve kapasitans) kayda değer değişimler oluşturur. Başka bir deyişle elektronlar metal bölgeden enjekte olurken, delikler de yarıiletkenden enjekte olur ve böylece bipolar (ambipolar) iletim mekanizması, Schottky diyotta meydana gelir. Bunun yanı sıra, deliklerin (çoğunluk yük taşıyıcılarının) bariyer yüksekliği yüksekken, elektronların (azınlık yük taşıyıcıların) bariyer yüksekliği düşük olmalıdır ve bunların toplamı yarıiletkenin enerji band aralığına eşit olur. Bariyer yüksekliğinin $\Phi_B > E_G/2$ olduğu durumlarda enjeksiyondan söz edilebilir ve tersine tabaka üretildiğinde azınlık yük taşıyıcıların miktarı çoğunluk yük taşıyıcılarının miktarını geçer ($n > p$). Uygun besleme altında, enjekte olmuş azınlık yük taşıyıcıların bir kısmı yarıiletkenin nötral bölgesine doğru difüz ederken, eşit miktarda ters yüklü çoğunluk yük taşıyıcıları nötralliği korumak için arka elektrottan içeri girer. Sonuç olarak iletim modülasyonu meydana gelir ve kendisini **i)** diyotun seri direncini azaltarak, **ii)** I-V ölçümlerinden elde edilen doğrultma oranını (doğru akım/ters akım) iyileştirerek belli eder. Admittans ölçümleri için, diğer taraftan azınlık yük taşıyıcılarının difüzyonu C_M ile beraber G_M değerinin de düz beslemede ve özellikle düşük frekansta güçlü şekilde etkiler (dc iletkenliğinde olduğu gibi). Eşdeğer olarak, C-V ölçümlerinde düşük frekans altında besleme tarandığında, kapasitans maksimum noktaya ulaşınca kadar artar sonra da keskin bir şekilde azalır. Bundan dolayı şekli ve tepe noktasının pozisyonu, yarıiletkenin bulk direncine ve metal kontağa bağlı olan bir tepecik C-V eğrilerinde kendini gösterir. Bunun yanında tepeciğin maksimum noktası düz beslemedeki artış ve ölçüm frekansının artmasıyla azalır.

Diğer taraftan MS yapının bariyer yüksekliği ac direncin dc dirence eşit olduğu durumda C-V eğrisinin maksimumundan elde edilir.

Literatürde yayınlanan son çalışmaların ışığında ϕ_{bn0} 'nin sıcaklığa bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Bariyer yüksekliği (ϕ_{bn0}), C-V ölçümlerinden elde edildiğinde sıcaklık

artmasıyla düşen bir değişim göstermekte iken I-V ölçümlerinden elde edilende sıcaklık arttıkça artan bir değişim göstermektedir. Önerilen çeşitli modellerden ayrı olarak homojen olmayan bir bariyere sahip olması, çok basamaklı tünelleme bu gözlemleri açıklamada başarılı görünmektedir.

2.3.2 Omik Kontak

Omik kontak, yarıiletken aygıtın toplam direncinin yanında önemsiz bir eklem direncine sahip olan metal-yarıiletken kontakten oluşur. Tatminkar bir omik kontak, aygıt performansını kayda değer bir şekilde etkilemez ve aygıtın aktif bölgesinin üzerine düşen voltaj, omik kontağın üzerine düşen voltajdan daha fazladır. Tüm yarıiletken aygıtlarda bağlantı için en az iki metal-yarıiletken kontak vardır.

Kontak direnci; arayüzeydeki voltaja karşılık akım yoğunluğunun türeviyle elde edilir. Sıfır beslemede kontak direnci omik kontaklar için önemli bir değer olur.

$$R_C \equiv \left(\frac{dJ}{dV} \right)^{-1}_{V=0} \quad (2.40)$$

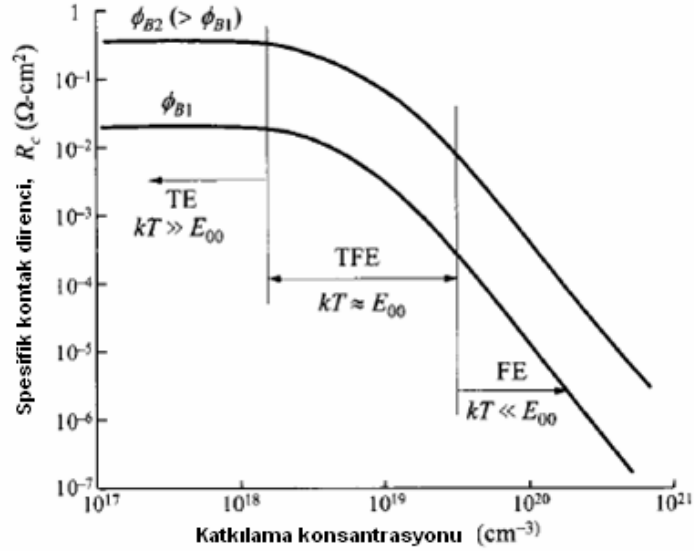
Orta seviyeli katkıya göre düşük katkı için ve/veya orta karar ölçüde yüksek sıcaklıklar için ($kT \gg E_{00}$) standart termoiyonik emisyon (TE) açıklaması kullanılarak

$$R_C = \frac{k}{A^{**}Tq} \exp\left(\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \propto \exp\left(\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.41)$$

ifade edilir. Denklem (2.39) gösteriyor ki düşük bariyer yüksekliğinde düşük direnç R_C elde edilir.

Daha yüksek doping seviyelerinde $kT \approx E_{00}$ ise, termoiyonik alan emisyonu (TFE) baskındır.

Daha da yüksek doping seviyelerinde $kT \ll E_{00}$ alan emisyonu (FE) baskındır. Düşük değerlerde R_C elde etmek için yüksek katkı konsantrasyonu, düşük bariyer yüksekliği ya da her ikisi olmalıdır.



Şekil 2.17 Kontak direncinin katkı konsantrasyonuna (ve E_{00}), bariyer yüksekliğine ve sıcaklığa bağlılığı. TE, TFE ve FE bölgelerini içermektedir. (Sze M. S., 2007)

Bir omik kontak aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır. (Caferov T., 1998)

1. Kontakların akım-gerilim karakteristiği lineer olmalı yani doğrultucu özellik göstermemelidir. Diğer bir deyişle kontak direnci akım yönüne bağlı olmamalıdır.
2. Kontak direnci akımla orantılı olarak değişmemelidir.
3. Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük (en az bir kat) olmalıdır.
4. Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.
5. Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir, yani yapışkanlığı yüksek olmalıdır.
6. Kontak malzemesinin yarıiletken içine azınlık taşıyıcıları salmaması (injeksiyon özelliği göstermemesi) gerekmektedir.

Omik kontak malzemesi seçerken dikkat edilecek diğer hususlar şunlardır:

1. n-tipi yarıiletkende kullanılan metalin çıkış işi, yarıiletkenin çıkış işinden daha küçük olmalıdır.
2. p-tipi yarıiletken de ise, metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha büyük olmalıdır.
3. n-tipi yarıiletkene uygulanacak olan metal, yarıiletkene karşı donör özelliği göstermelidir.
4. P-tipi yarıiletken için ise, uygulanacak metal, akseptör özelliği göstermelidir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Cr/Si Eklemlerin Hazırlanması

3.1.1 Altlıkların Hazırlanması

Kaplama işleminde kullanılacak olan (100) yönelimine sahip n-tipi ve (111) yönelimine sahip p-tipi Si altlıklar 50x50x3 mm boyutlarında kesilerek hazırlandı. Kullanılan n-tipi Si altlıkların öz dirençleri 5-10 Ω -cm ve p-tipi Si altlıkların öz dirençleri 10.5-19.5 Ω -cm'dir.

Altlıklar kaplama öncesi RCA temizleme yöntemi göz önünde bulundurularak temizlendi.

RCA temizleme yöntemi:

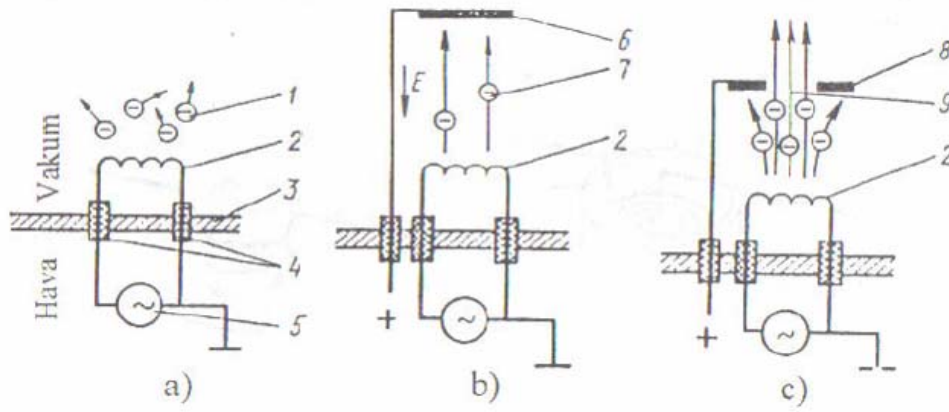
1. Altlıklar trikloretilen ($C_2H_4Cl_3$) içinde 5 dakika kaynatılır.
2. Ardından saf suya tutulur.
3. Ultrasonik sistemde çalkalama işlemine tabi tutulur.
4. Altlıklar HCl/ H_2O_2 (1/1 oranındaki) çözeltisine 10 dakika batırılır.
5. Altlıklar H_2SO_4/H_2O_2 (2/1 oranındaki) çözeltiye 5 dakika süresince batırılır.
6. Ardından altlıklar 5 dakika boyunca saf suyla yıkanır.
7. Son olarak altlıklar HF/ H_2O (1/10 oranındaki) çözeltiye 30 saniye batırılıp çıkarılır.
8. Ardından tekrar saf suda 15-20 dakika yıkanır.

Temizleme işlemi biten altlıklar kaplama işlemi için hazırlanmış özel bir taşıyıcıya; taşıyıcı da hedefin 0.1 m karşısına yerleştirildi.

3.1.2 Elektron-Demeti Buharlaştırma Metodu ile Kaplama

Malzeme yüzeyine, hızlandırılmış elektronların bombardımanı ile elektronların kinetik enerjisi malzemeye iletilir ve böylece malzeme erime veya buharlaşma sıcaklığına kadar ısınır. Bu olay elektron bombardımanı ile buharlaştırma metodunun temelidir.

Oda sıcaklığında çok az sayıda elektronun enerjisi metalin iş fonksiyonundan büyüktür. Bu nedenle çok az sayıda elektron metalden kopabilir. Fakat sıcaklık arttıkça metalden kopan elektronların sayısı artar. Bu olaya yani yüksek sıcaklığa kadar ısıtılmış malzemelerden elektronların koparılmasına termoelektron emisyon adı verilir. Sıcaklığın etkisiyle elektron yayınlayan metaller termoelektron katot veya katot olarak adlandırılır. Katodun ısıtılması, vakum ortamında yüksek akım geçişi ile oluşturulur.

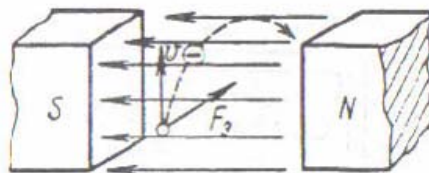


Şekil 3.1 (a) Termoelektron emisyonu, (b) elektronların hızlanması ve (c) elektron yayılmasının gösterimi: 1 saçılan elektronlar, 2 termokatot, 3 vakum fanusunun tabanı, 4 yalıtkan, 5 termokatotun güç kaynağı, 6 ve 8 anot, 9 elektron demeti (Caferov T., 2000)

Elektron yayınlanmasının nasıl olduğunu inceleyelim (Şekil 3.1): sarmal termokatot (2) vakum fanusunun tabanına yerleştirilir ve geçiş, yalıtkanların vasıtasıyla ile dışarıdaki akım kaynağı (5) ile birleştirilir. Sarmal elektrokot devresinden geçen akımla termokatot ısıtılır ve elektronlar (1) yayınlanır. Bu elektronların enerjileri ve yönleri farklıdır. Elektronların kinetik enerjisini artırmak ve hareketlerini yönlendirmek için hızlandırıcı elektrik alan uygulanır.

Katottan (2) yayınlanan elektronları hızlandırmak için, katodun üstüne anot (6) yerleştirilir. Şekil 3.1’de sarmal katot (2) ile anot (6) arasındaki sabit elektrik alanın yönü ok ile gösterilmiştir. Katot ile anot arasında uygulanan potansiyel farkı 5-10kV arasındadır. Katottan (2) yayınlanan elektronlar, anot tarafından (6) çekilirler ve böylece hızlanmış elektron akışı meydana gelir. Elektron demetinin oluşması için delikli anot (8) kullanılır.

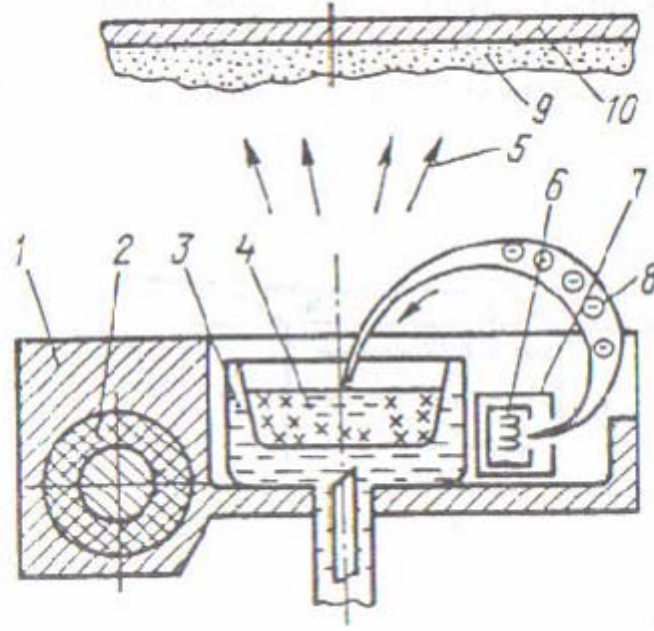
Katottan yayınlanan elektronlar sabit elektrik alanın etkisiyle hızlanırlar. Bu elektron akışını, malzemenin yüzeyine odaklamak için sabit manyetik alan uygulanır.



Şekil 3.2 Elektronun manyetik alanda hareketi (Caferov T., 2000)

Şekil 3.2’de $\vec{v}$ yönünde hareket eden elektrona manyetik alanda etki eden Lorentz kuvveti gösterilmektedir. Lorentz kuvvetinin, elektronun hızına ($\vec{v}$) dik olması nedeniyle, bu kuvvet sadece elektronun yönünü değiştirmektedir. Lorentz kuvvetinin etkisiyle elektronların

yörüngesi yarı dairesel şekil alır ve böylece elektronlar buharlaştırılacak malzemenin yüzeyine odaklanır.



Şekil 3.3 Elektron demeti ile buharlaştırma: 1 magnet kutbu, 2 elektromagnet, 3 soğutulan pota, 4 buharlaştırılan malzeme, 5 malzeme moleküllerinin akışı, 6 termokatot, 7 odaklama sistemi, 8 elektron demeti, 9 ince film, 10 altlık (Caferov T, 2000)

Elektron buharlaştırıcısı 3 temel parçadan oluşur: elektron tabancası, manyetik odaklama sistemi ve su ile soğutulan pota. (Şekil 3.3)

Elektron tabancası, elektron akışının sağlanması içindir ve tungsten termokatot (6) ile elektrik odaklama sisteminden (7) oluşur.

Manyetik odaklama sistemi, elektron tabancasından (6) çıkan elektronların, buharlaştırılacak malzemenin üzerine odaklanması için kullanılır. Elektron bombardımanının etkisiyle malzeme (4) eriyerek buharlaşır ve neticede malzeme moleküllerinin akışı (5) altlığın (10) yüzeyinde ince film şeklinde (9) kaplanır.



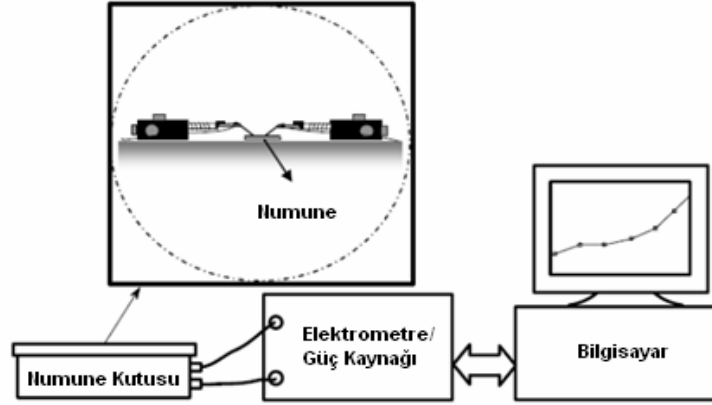
Şekil 3.4 Elektron demeti buharlaştırma sistemi

3.2 Eklemlerin Elektriksel Özellikleri

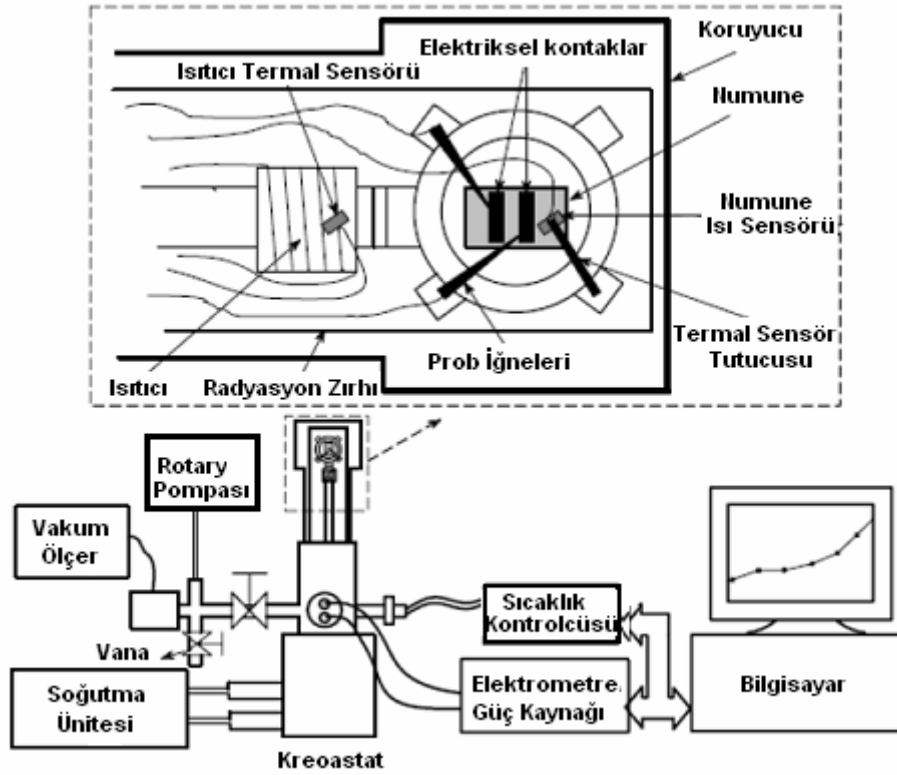
3.2.1 I-V Ölçümleri

Hazırlanan örneklerin oda sıcaklığındaki akım-gerilim ölçümleri Şekil 3.4'te gösterilen sistemle, sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri ise Şekil 3.5'de gösterilen sistemle elde edilmiştir. Bunun için akım-gerilim sisteminde Keithley 6517 marka elektrometre kullanılmıştır.

Oda sıcaklığındaki iletkenlik ölçüm sistemine bazı öğelerin eklenmesiyle sıcaklığa bağlı iletkenlik ölçüm sistemi elde edilir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 3.5'de verilmiştir. Bu sistemde soğutucu olarak He krostat (ARS, S204) kullanılmıştır. Bu sistem $13-450^{\circ}K$ aralığındaki sıcaklığı kontrol edebilmemizi sağlar. Örneklerin elektrik kontağı, krostatın kuyruğundaki iki iletken iğne ile yapılır. Sıcaklığı algılamak için iki termal sensör bulunmaktadır. Bunlardan biri ısıtıcının üzerine yerleştirilir ve diğeri de örneğin sıcaklığını ölçmek için örneğin üzerine yerleştirilir. Sıcaklık kontrolü LakeShore 331 model sıcaklık kontrol aygıtı ile sağlanmıştır. Radyasyon, düşük sıcaklıklara ulaşılmasını engellediği için ölçüm sistemi radyasyon ve vakum kalkanı ile çevrelenmiştir.



Şekil 3.5 Oda sıcaklığında dc iletkenlik ölçüm sistemi



Şekil 3.6 Sıcaklığa bağlı dc iletkenlik ölçüm sistemi

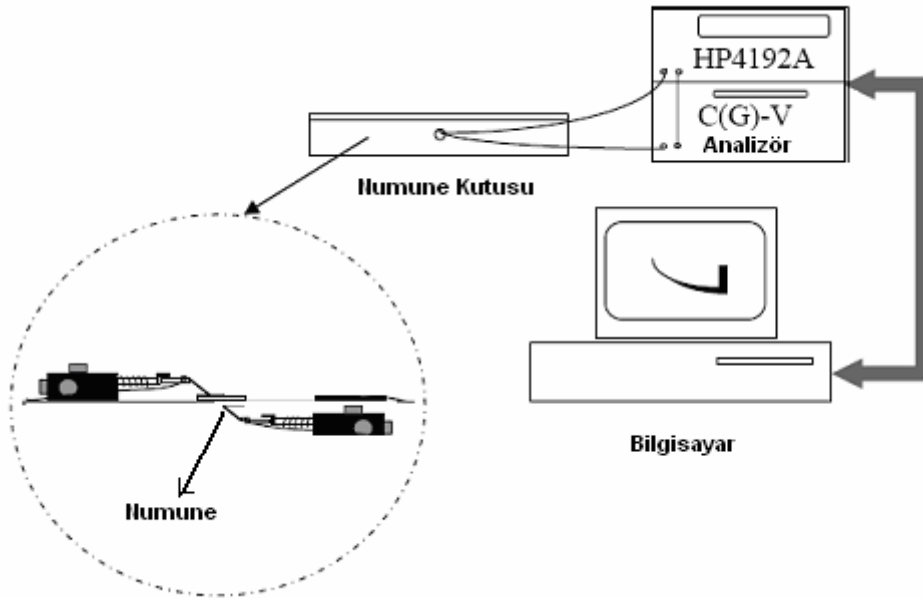
Akım-gerilim ölçümleri, p-tipi ve n-tipi olmak üzere iki örnek üzerinden 300 ile $380^{\circ}K$ arasındaki sıcaklık değerlerinde alındı.

Eklemlerin kontak malzemesi olarak In-Ga ve Ag pasta kullanıldı. silisyumun arka yüzüne Ag pasta ile, diyodun ön yüzüne de (Cr kaplı kısım) In-Ga alaşımı ile omik kontak yapıp akım-

gerilim ölçümleri bu kontaklar üzerinden okundu.

3.2.2 C-V Ölçümleri

Admittans yöntemi yüke duyarlı spektroskopik bir tekniktir. Burada dc gerilimin üzerine bindirilmiş ac sinyali incelenen örneğe uygulandığında, örneğin üzerinden geçen ac akım ile bulunur. Bu ac akım, sığa ve iletkenlik kısımları içerisinde barındırır. Ayrıca örneklerin frekans duyarlılığı uygulanan dış voltajla ve/veya ac frekans ile izlenebilir. Kapasitans-gerilim (C-V) ölçümleri LCR HP4192A model empedans analizör ile alındı. Bu ölçümler hem frekansa bağlı hem de sıcaklığa bağlı alınarak incelendi. Data alım sürecini daha etkin hale getirebilmek için bilgisayar kontrollü sistem hazırlandı. Ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 Sıcaklığa ve frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi

3.3 I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen $\log(I)$ -V grafiğinin eğiminden idealite faktörünün (η) hesabı Denklem (2.35) ile yapıldı.

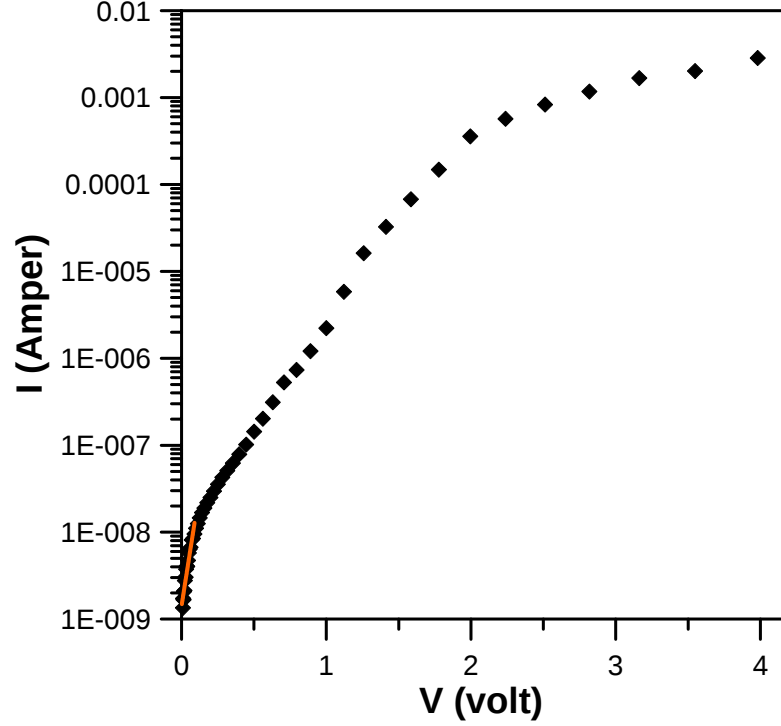
Akım-gerilim ölçümlerinden bariyer yüksekliği hesabı yapıldı. Bunun için $\log(I)$ -V grafiğini ekstrapole ederek saturasyon akımı (I_0) elde edildi ve bu akım değeri bariyer yüksekliği Denklem (2.36)’da yerine koyarak bariyer yüksekliği hesabı yapıldı.

İletim mekanizmalarının tayini için $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiklerinin eğim değerlerinden yararlanıldı. Bu grafiklerin eğimi $I_0 V^m$ oranındaki m değerlerini verir. m değeriyle etkin olan iletim

mekanizması belirlendi.

Ayrıca arayüzey hakkında bilgi elde etmek için $I=m+1$ eşitliğinden yola çıkarak $I-1/T$ grafiği çizilip, bu grafiğin eğim değeri kullanıldı.

Tünelleme mekanizmasının etkisini anlamak için akım-gerilim ölçümlerinden aktivasyon enerjisinin hesabı yapıldı. Bunun için $I_0 - q/kT$ grafiği çizildi ve bu grafiğin eğimi bize aktivasyon enerjisini verdi.



Şekil 3.8 Cr/n-tipi Si eklemin 360K sıcaklıktaki $\ln(I)$ -V grafiği

Yukarıdaki grafik için elde edilen idealite faktörü $\eta = \frac{q}{kTA}$ formülü ile 1.31 olarak

hesaplandı. Burada $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K; T, sıcaklık; A, eğimdir. Bariyer

yüksekliği $\phi_{bn0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^{**}T^2}{I_0} \right)$ formülünden bariyer yüksekliği 1.01 eV olarak hesaplandı.

A filmin alanı; A^{**} ise Richardson sabitidir.

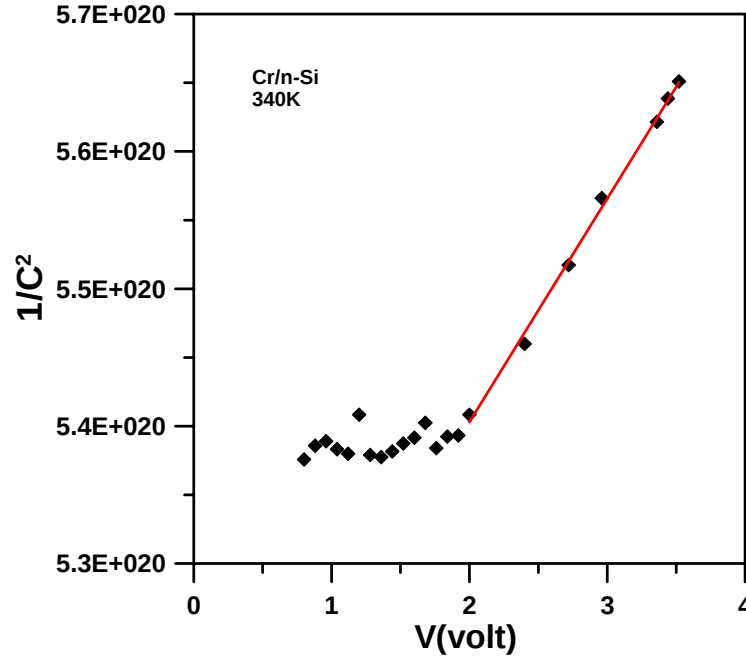
3.4 C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Kapasitans- gerilim ölçümleri 1kHz-1MHz arasındaki frekans değerlerinde ölçülmüştür.

Azınlık yük taşıyıcıları düşük frekanslara yanıt verebildiğinden, yüksek frekans C-V ölçüm

sonucu diyotu karakterize etmekte kullanıldı. Yani 1MHz'deki $1/C^2 - V$ grafiğinden N_D katkılama miktarı elde edildi. Azınlık yüklerin etkisinden dolayı bariyer yüksekliği C-V grafiklerinin maksimum değerinden elde edildi.

N_D katkılama miktarının hesabı için, $1/C^2 - V$ grafiğinin (Şekil 3.8) eğimi Denklem (2.5)'de yerine yazıldı.



Şekil 3.9 Cr/n-tipi Si eklemnin 340 K sıcaklıktaki $1/C^2 - V$ grafiği

Fermi enerjisi ile iletim bandının tabanı arasındaki potansiyel farkı (ϕ_n) hesabı Denklem (2.39) yardımıyla yapılır.

ψ_{bi} değeri, $1/C^2 - V$ grafiğinin voltaj eksenini kestiği yer oluşum potansiyelini verir. ϕ_n değeri de hesaplandıktan sonra bariyer yüksekliğinin ϕ_{bn} hesabı Denklem (2.38) ile yapılır.

Diğer taraftan MS yapının, ac direnci dc direncine eşit olduğu durumda bariyer yüksekliği (ϕ_{bn}) C-V eğrisinin maksimumundan elde edilir. Bu çalışmadaki bariyer yüksekliği (ϕ_{bn}) hesabı bu şekilde yapılmıştır.

3.5 Isıl İşlem

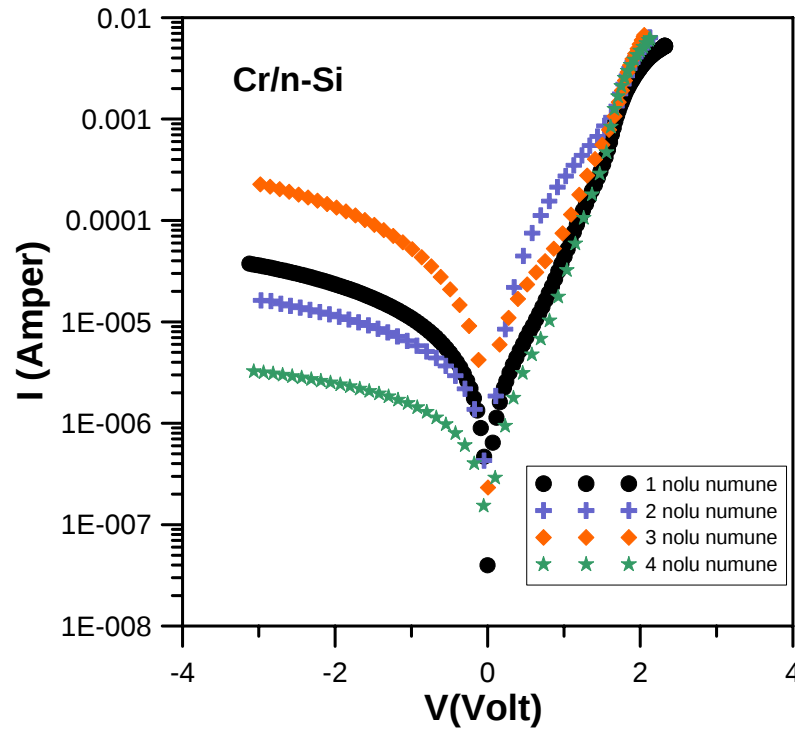
Üretilen Cr/Si eklemeler 400–500–600°C sıcaklık altında tavlama işlemine tabi tutuldu. Tavlama işlemi vakum altında $\sim 10^{-4}$ Torr basınç altında özel bir porselen fırın içinde gerçekleştirildi. Fırının çevresine sarılan tellere verilen belirli voltajlarla fırın istenilen sıcaklığa ısıtıldı ve fırının içine yerleştirilen ısıölçerle de sıcaklık kontrolü sağlandı.

4. BULGULAR

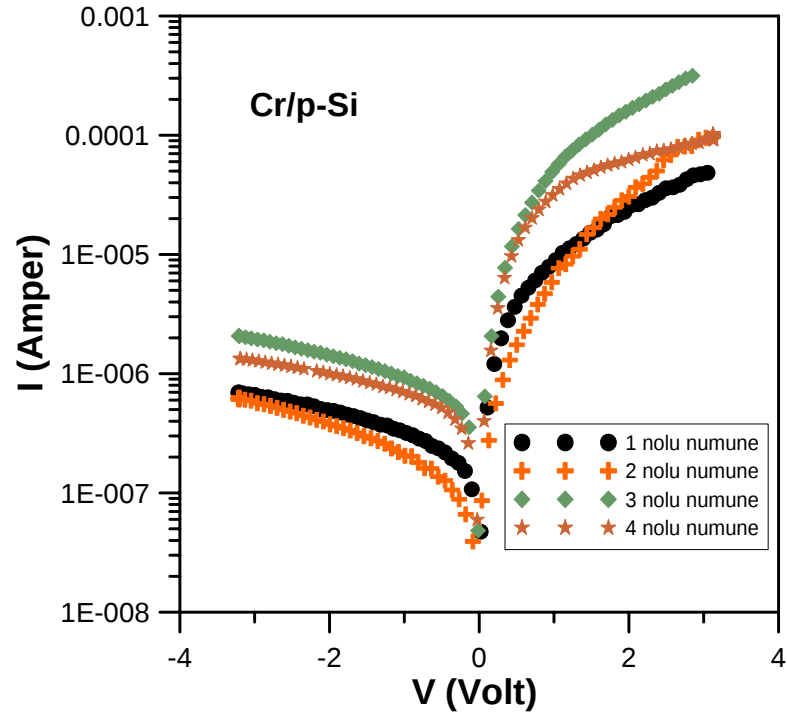
4.1 Çeşitli Cr/ Si Eklemlerin Karanlıktaki I-V Karakteristikleri

Elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile üretilen dört adet Cr/n-tipi Si ve dört adet Cr/p-tipi Si eklemin oda sıcaklığında ve karanlıkta alınan akım-gerilim ölçümlerinden çizilen grafikler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Bu datalardan Denklem (2.35) yardımıyla elde edilen idealite faktörü ve Denklem (2.36) yardımıyla da elde edilen bariyer yüksekliği değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Kaplama yapılırken taşıyıcı üzerinde birkaç tane altlık bulunduğu Cr numunesinin tam karşısındaki Si altlığın üzerinde biriken Cr filmi ile kenarlardaki Si altlıkların üzerine biriken Cr filmleri aynı kalınlığa ve aynı homojenliğe sahip olmayabilir. Ayrıca her ne kadar maskeleme işlemi yapıldıysa da numunelerin film alanları farklılık göstermektedir (1 cm^2 ile 1.65 cm^2 arasında değişiklik göstermektedir). Bu sebepler numuneler arasındaki idealite ve bariyer yüksekliğindeki bu çeşitliliği izah edebilir. Bu çeşitlilikte numunelerin farklı arayüzey özelliğine sahip olduğunu gösterir.



Şekil 4.1 Cr/n-tipi Si eklemlerin oda sıcaklığında ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği



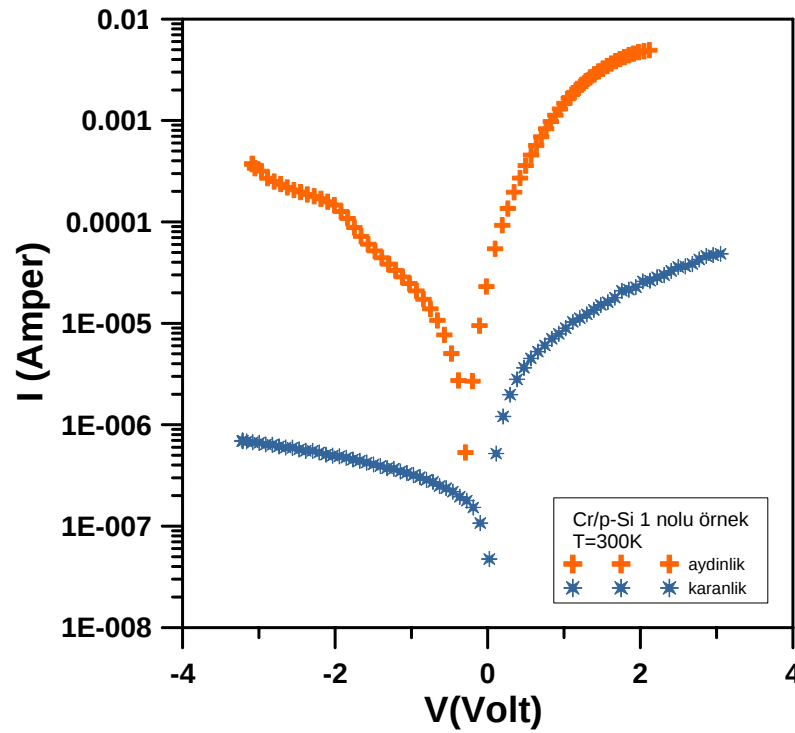
Şekil 4.2 Cr/p-tipi Si eklemlerin oda sıcaklığında ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği

Çizelge 4.1 Çeşitli Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin diyot parametreleri

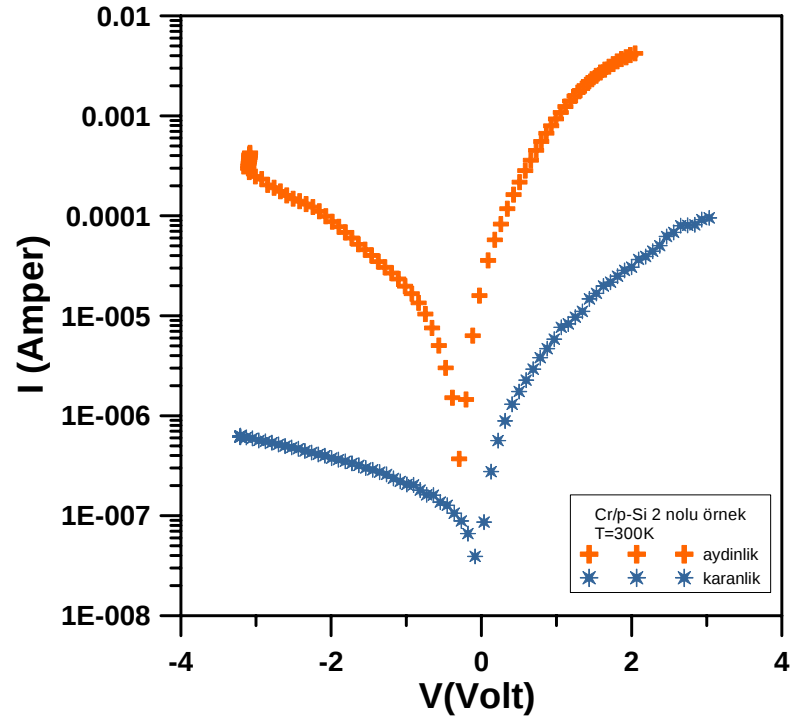
	Numune no	η (idealite faktörü)	ϕ_{bn} (eV)(bariyer yüksekliği)
p-tipi	1	1.20	0.86
	2	1.84	0.86
	3	1.32	0.85
	4	1.05	0.86
n-tipi	1	1.22	0.84
	2	1.13	0.83
	3	1.24	0.81
	4	2.41	0.85

4.2 Cr/Si Eklemlerin Fotovoltaik Özellikleri

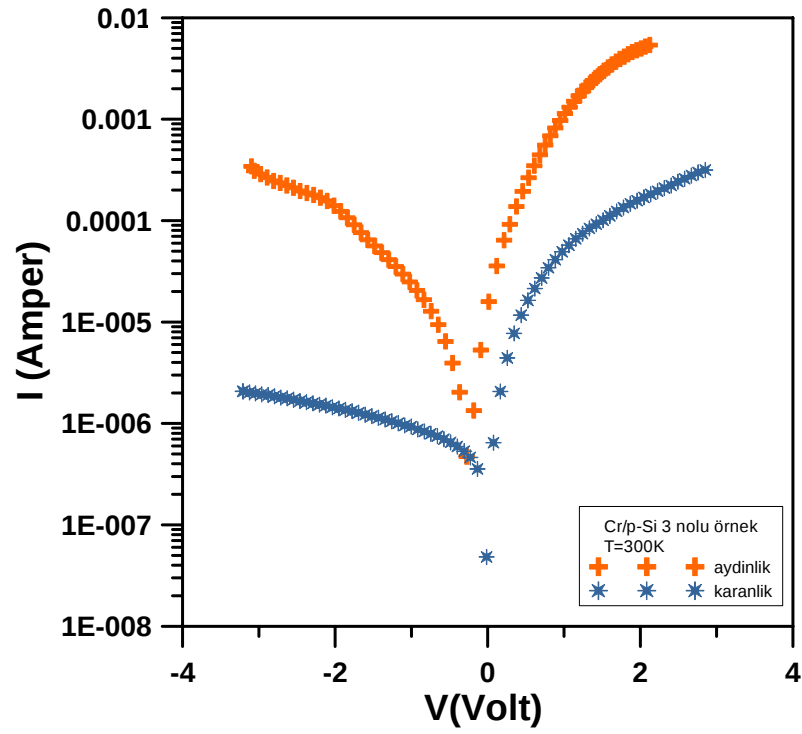
Cr/Si eklemlerin, oda sıcaklığında karanlıkta ve aydınlıkta alınan I-V ölçümlerinden fotovoltaik parametreleri incelendi. Bu parametre değerleriyle Cr/Si eklemlerin iyi fotovoltaik özellik gösterdiğini söyleyebiliriz. Aşağıda Cr/n-Si ve Cr/p-Si Schottky diyotların aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafikleri Şekil 4.3-4.10'da gösterilmiştir ve fotovoltaik değerleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir.



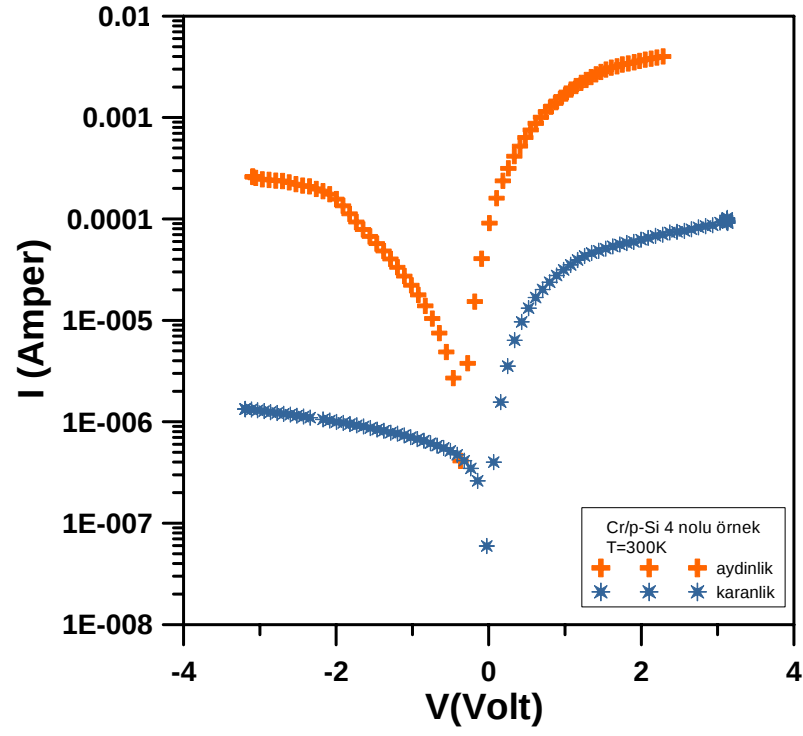
Şekil 4.3 Cr/p-Si 1 nolu eklem, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki $\ln I$ -V grafiği



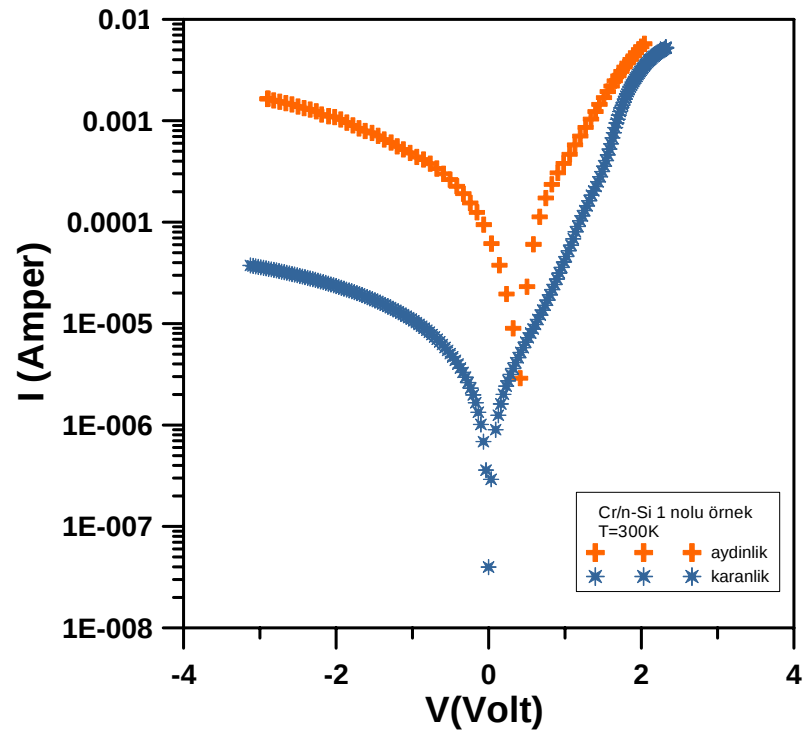
Şekil 4.4 Cr/p-Si 2 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



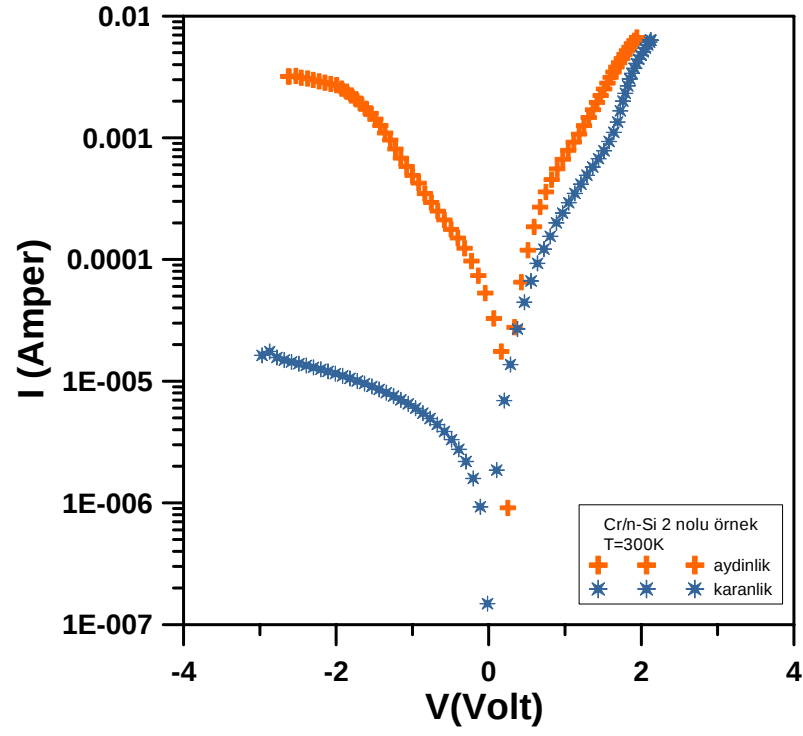
Şekil 4.5 Cr/p-Si 3 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



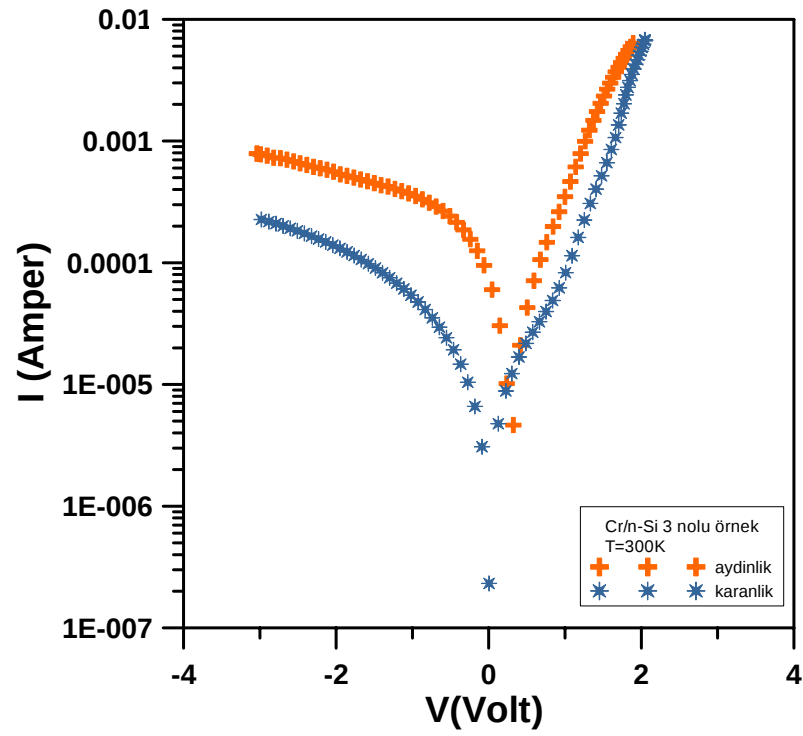
Şekil 4.6 Cr/p-Si 4 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



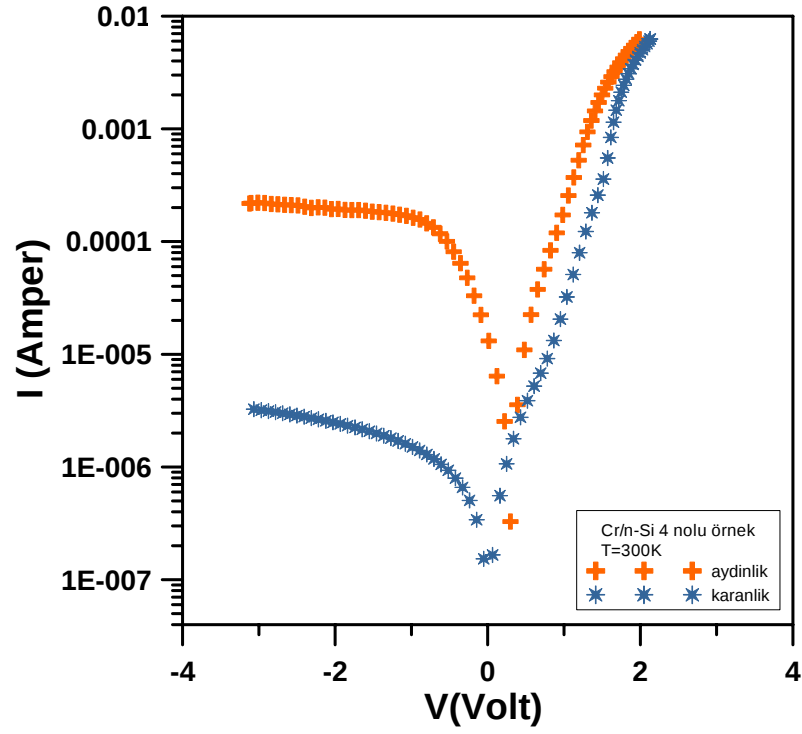
Şekil 4.7 Cr/n-Si 1 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



Şekil 4.8 Cr/n-Si 2 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



Şekil 4.9 Cr/n-Si 3 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği



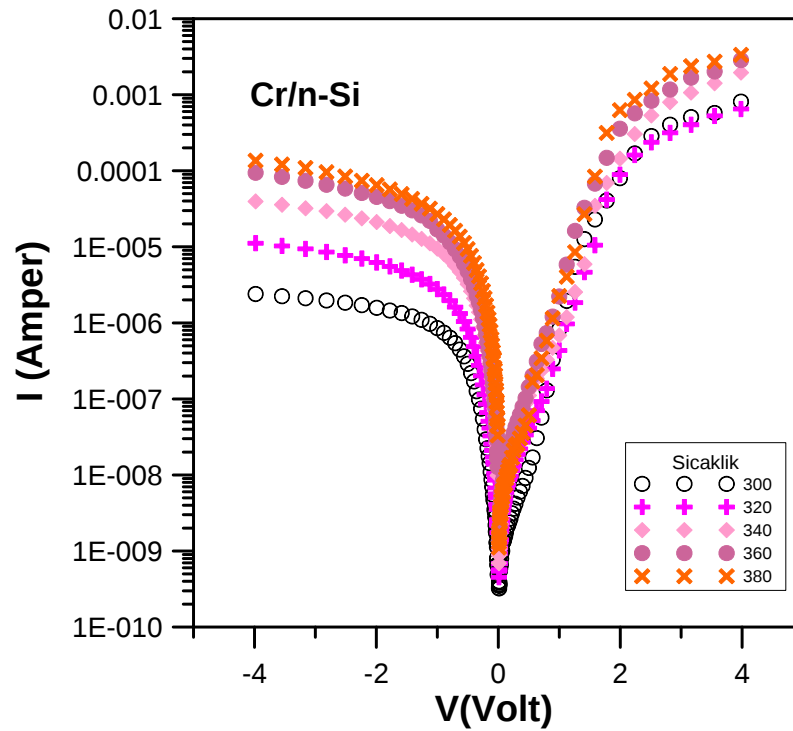
Şekil 4.10 Cr/n-Si 4 nolu eklemin, oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki lnI-V grafiği

Çizelge 4.2 Cr/Si eklemlerin fotovoltaiik parametreleri

	Numune No	$I_{sc} (\mu A)$	$V_{oc} (mV)$	I_{ayd} / I_{kar}
Cr/n-Si	1	13.0	327	45
	2	23.0	249	236
	3	25.2	366	4
	4	8.0	376	79
Cr/p-Si	1	15.7	285	298
	2	6.0	337	235
	3	9.9	280	98
	4	44.5	370	158

4.3 Cr/n-tipi Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı I-V Karakteristikleri

En iyi fotovoltaiik özellik gösteren numunenin (Cr/n-tipi Si eklemlerinden 3 nolu numune) karanlıkta sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri alındı. Bu ölçüm datalarından Denklem (2.35) yardımıyla idealite faktörü, Denklem (2.36) yardımıyla da bariyer yüksekliği hesabı yapıldı. Sonuçlar Çizelge 4.3'te bulunmaktadır. Bu numunenin sıcaklığa bağlı akım-gerilim grafiği Şekil 4.11'de bulunmaktadır.



Şekil 4.11 Cr/n-tipi Si eklemin 300K ile 380K sıcaklık aralığında ölçülen akım gerilim değerleri

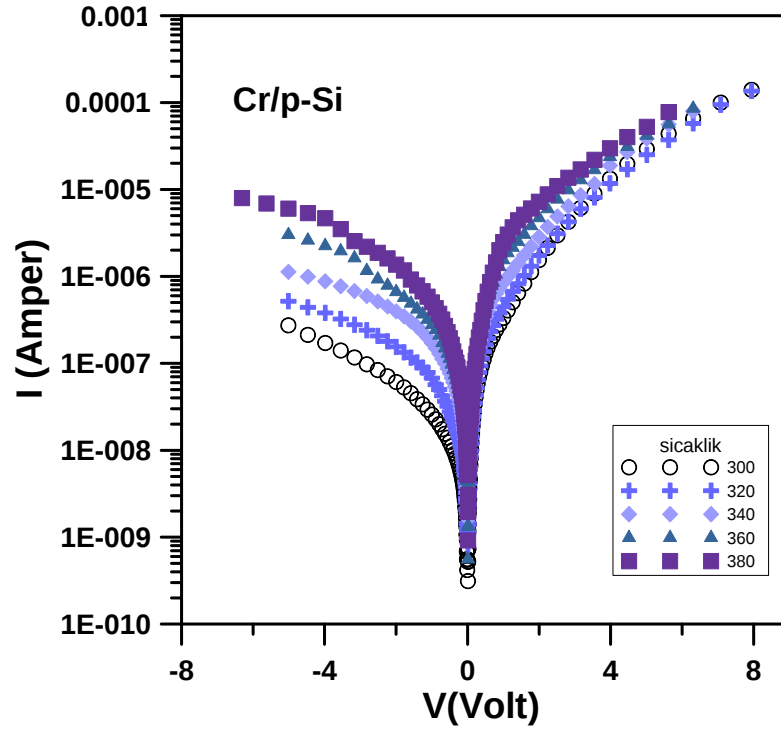
Çizelge 4.3 Cr/n-tipi Si eklem için değişik sıcaklıklardaki diyot parametreleri

T(K)	η (idealite faktörü)	ϕ_{bn} (eV)(bariyer yüksekliği)
300	1.65	0.87
320	1.52	0.92
340	1.39	0.97
360	1.31	1.01
380	1.14	1.08

4.4 Cr/p-tipi Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı I-V Karakteristiği

En iyi fotovoltaiik özellik gösteren numunenin (Cr/p-tipi Si eklemlerinden 4 nolu numune) karanlıkta sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri alındı. Bu ölçüm datalarından Denklem (2.35) yardımıyla idealite faktörü, Denklem (2.36) yardımıyla da bariyer yüksekliği hesabı yapıldı. Sonuçlar Çizelge 4.4'te bulunmaktadır.

Bu numunenin sıcaklığa bağlı akım-gerilim grafiği Şekil 4.12'de bulunmaktadır.



Şekil 4.12 Cr/p-tipi Si eklemin 300K ile 380K sıcaklık aralığında ölçülen akım gerilim değerleri

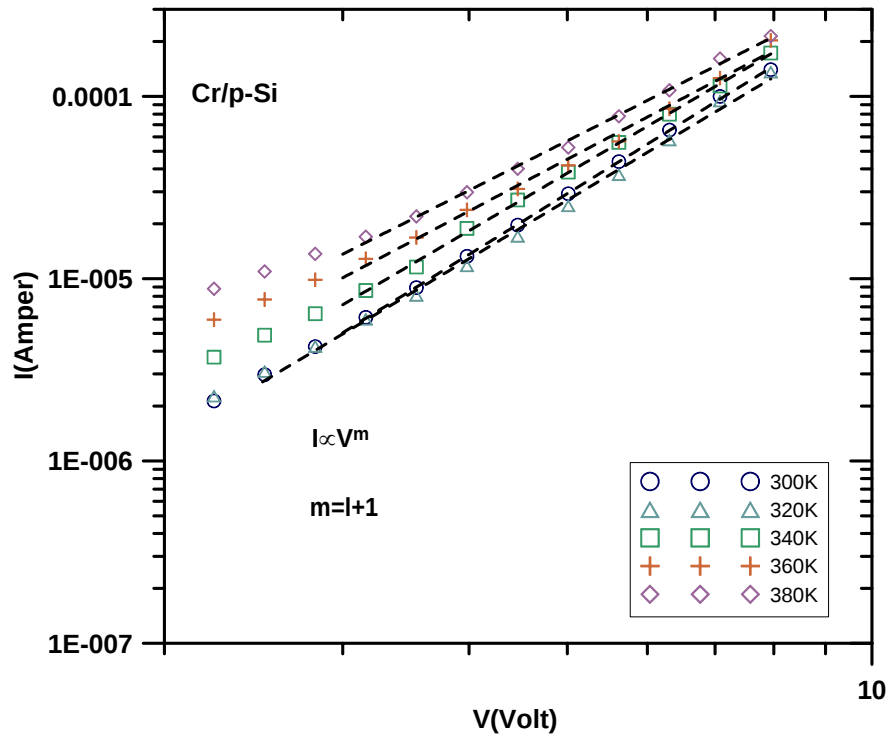
Çizelge 4.4 Cr/p-tipi Si eklemin değişik sıcaklıklardaki diyot parametreleri

T(K)	η (idealite faktörü)	ϕ_{bn} (eV)(bariyer yüksekliği)
300	1.63	0.85
320	1.62	0.90
340	1.54	0.93
360	1.48	1.00
380	1.46	1.05

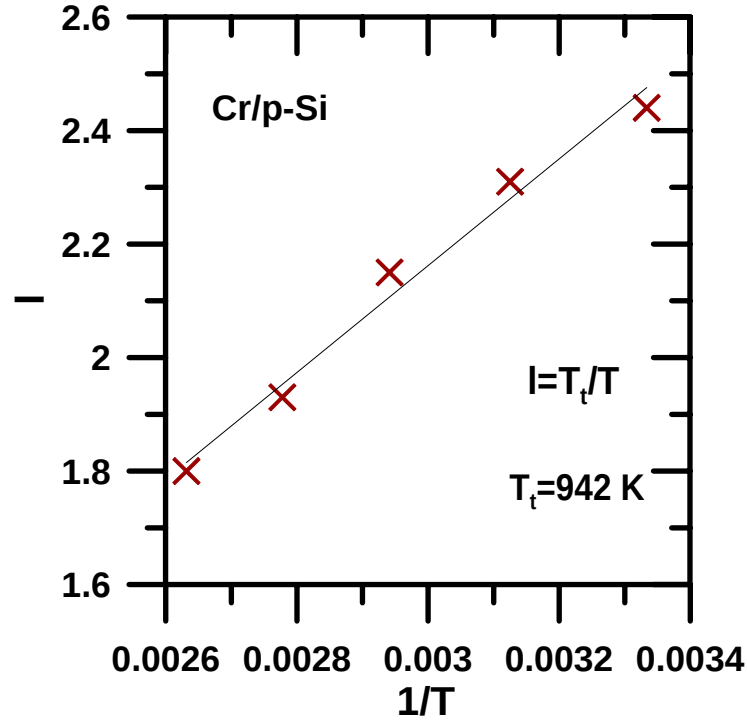
4.5 Cr/Si Eklemlerin İletim Mekanizması

Cr/n-Si ve Cr/p-Si eklemlerin, farklı sıcaklıklarda (300-380 K) alınan akım-gerilim ölçümlerinden çizilen $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiğinin (Şekil 4.13-Şekil 4.15) eğim değerinden iletim mekanizmasının tayini gerçekleştirildi. Çizilen bu grafiğin eğiminden, ($I \propto V^m$) m değeri elde edildi ve elde edilen m değerinden eklemden baskın olan iletim mekanizması tayin edildi. Yüksek elektrik alan bölgesinde ($V_F > 0.5$ V) etkin olan iletim mekanizmasının, her iki eklem türü içinde SCLC iletim mekanizması olduğu gözlemlendi.

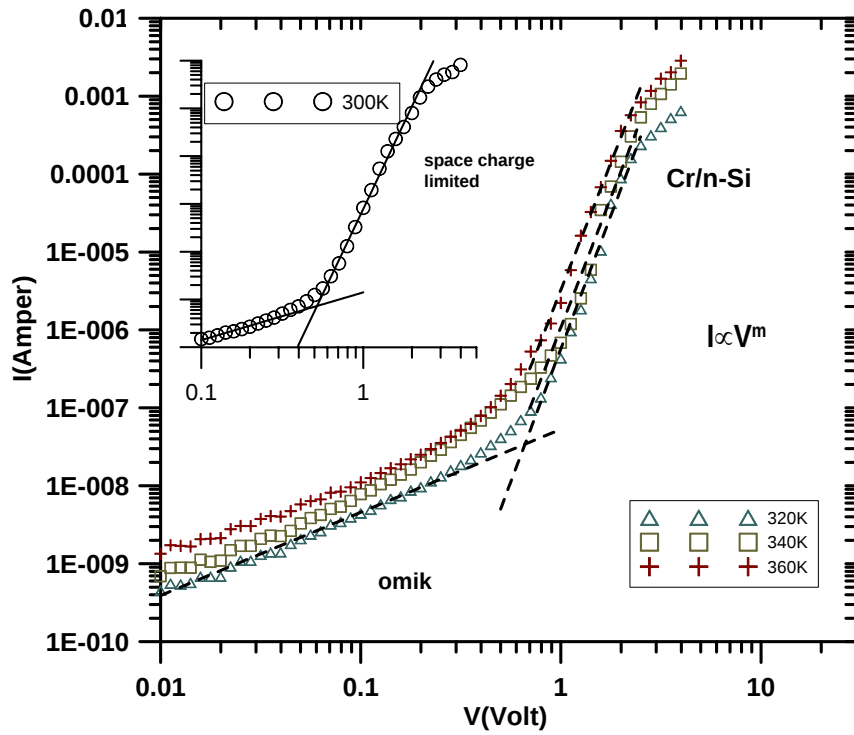
Arayüzey durumu hakkında bilgi edinebilmek için; $m=l+1$ eşitliğinden yola çıkarak $l-1/T$ grafiği (Şekil 4.14-Şekil 4.16) çizildi ve bu grafiğin eğiminden T_t değerleri elde edildi ($l = T_t/T$). Elde edilen tüm veriler Çizelge 4.5'te yer almaktadır.



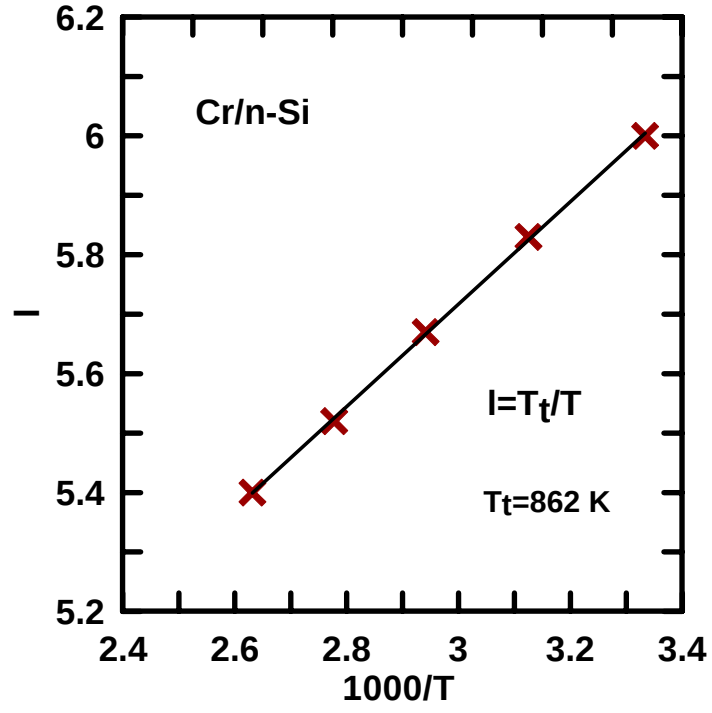
Şekil 4.13 Cr/p-Si eklemin $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği



Şekil 4.14 Cr/p-Si ekleminin I - $1/T$ grafiği



Şekil 4.15 Cr/n-Si eklemin $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği



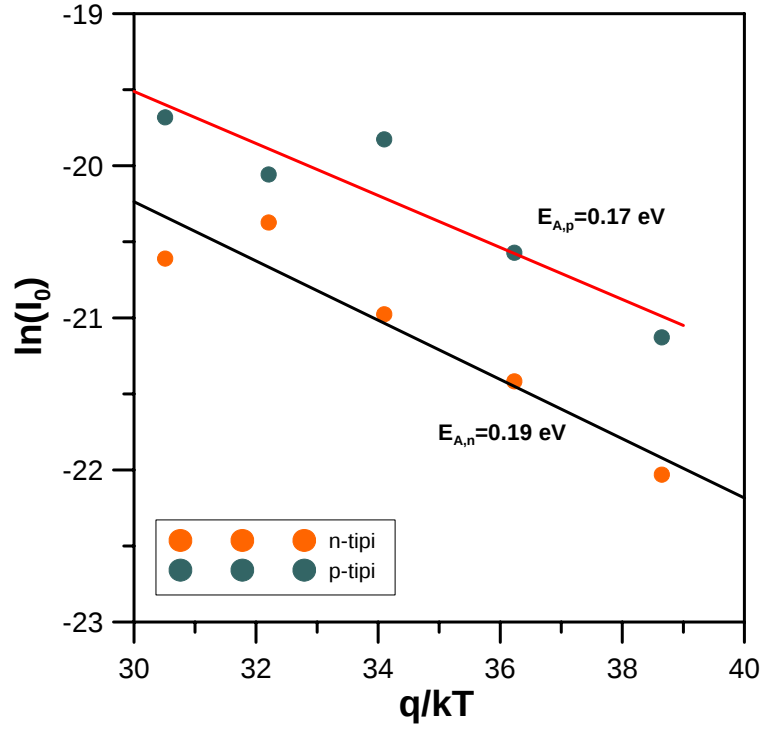
Şekil 4.16 Cr/n-Si eklemin l - $1000/T$ grafiği

Çizelge 4.5 Cr/Si eklemlerin m ve l değerleri

	T(K)	m	l
Cr/p-Si	300	3.44	2.44
	320	3.31	2.31
	340	3.15	2.15
	360	2.93	1.93
	380	2.80	1.80
Cr/n-Si	300	7.00	6.00
	320	6.83	5.83
	340	6.67	5.67
	360	6.52	5.52
	380	6.40	5.40

4.6 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si Eklemlerin Aktivasyon Enerjisi

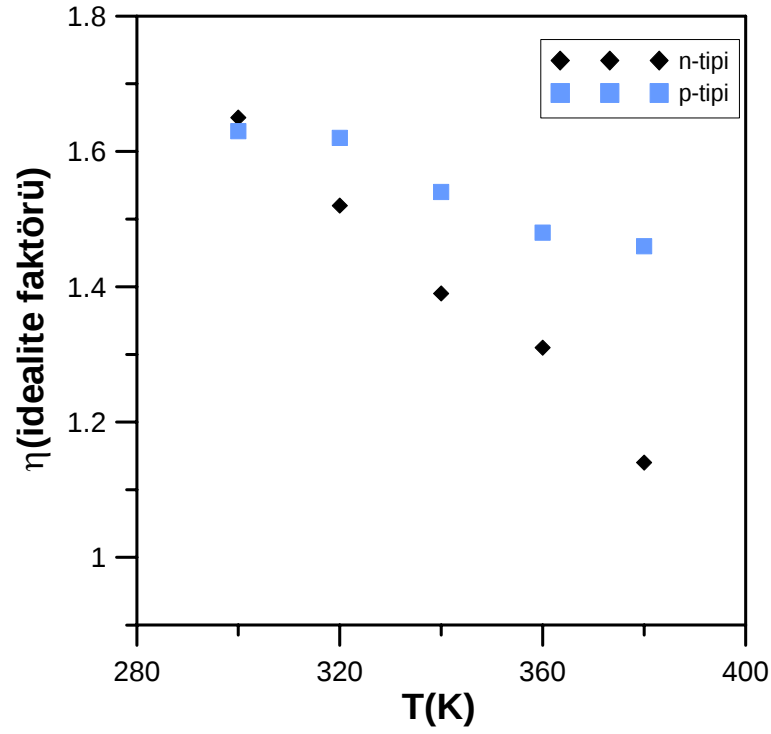
Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin aktivasyon enerjisi $\ln(I_0)-(q/kT)$ grafiğinin eğiminden elde edildi. Cr/n-tipi Si için aktivasyon enerjisi 0.19 eV, Cr/p-tipi Si için ise 0.17 eV olarak bulundu. $\ln(I_0)-(q/kT)$ grafiği Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



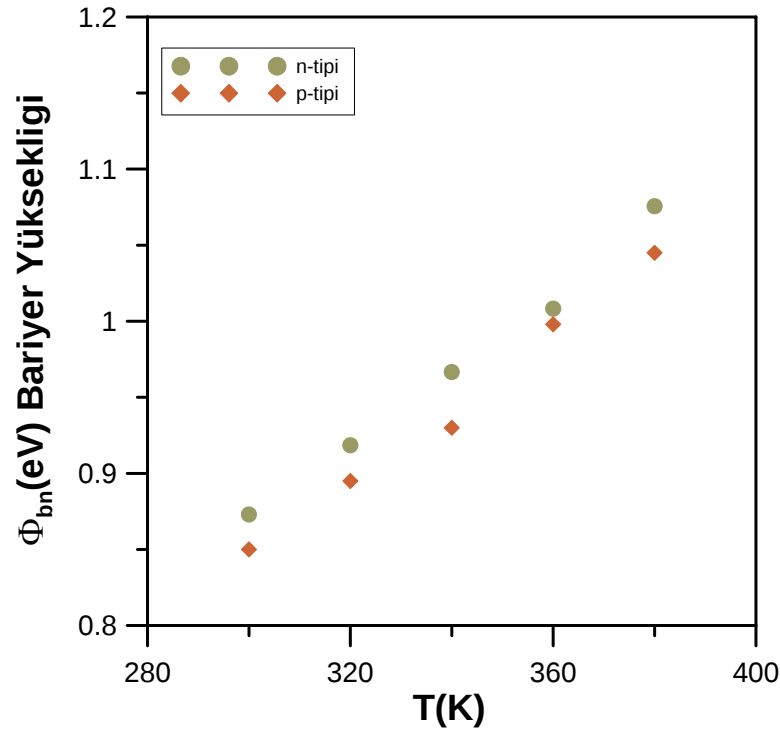
Şekil 4.17 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si için $\ln(I_0)-(q/kT)$ grafiği

4.7 Cr/n-tipi ve Cr/p-tipi Si Eklemlerin Diyot Parametrelerinin Sıcaklıkla Değişimi

Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin I-V datalarından elde edilen idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da ifade edilmiştir. Hem Cr/n-tipi Si eklemin, hem de Cr/p-tipi Si eklemin diyot parametrelerinin sıcaklıkla değişimi aynı düzendedir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi idealite faktörü sıcaklık artarken azalmakta iken, bariyer yüksekliği sıcaklık artarken artmaktadır. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur.



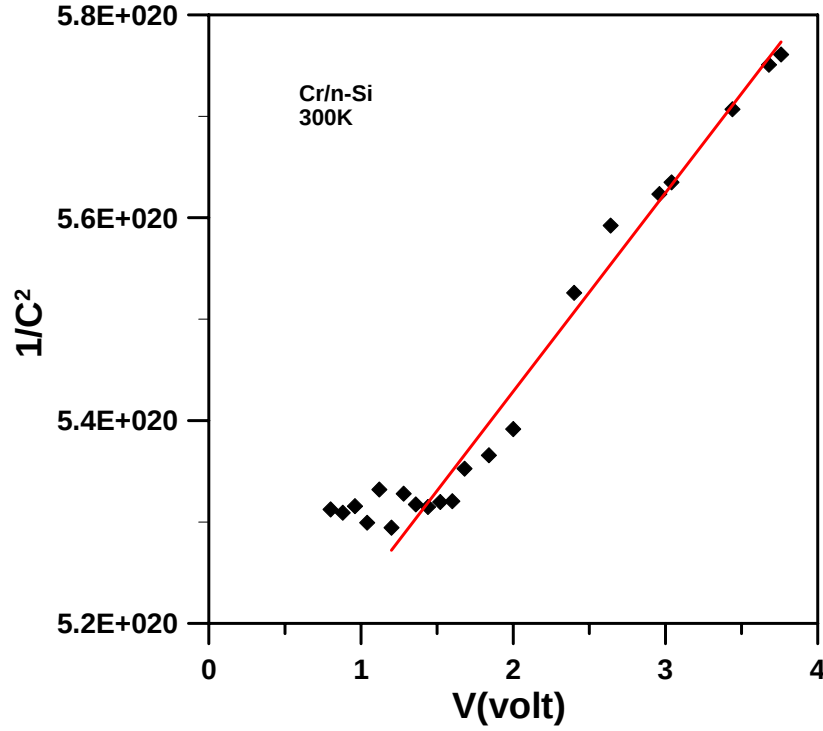
Şekil 4.18 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin idealite faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafiği



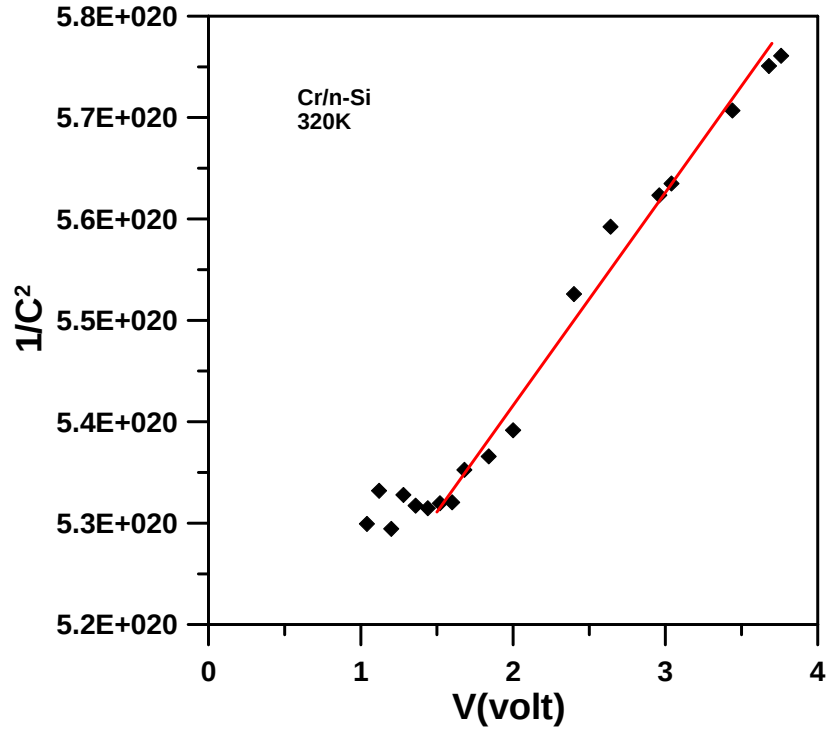
Şekil 4.19 Cr/n-tipi Si ve Cr/p-tipi Si eklemlerin I-V ölçümlerinden elde edilen ϕ_{bn} (bariyer yüksekliği) değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

4.8 Cr/n-Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı C-V Karakteristiği

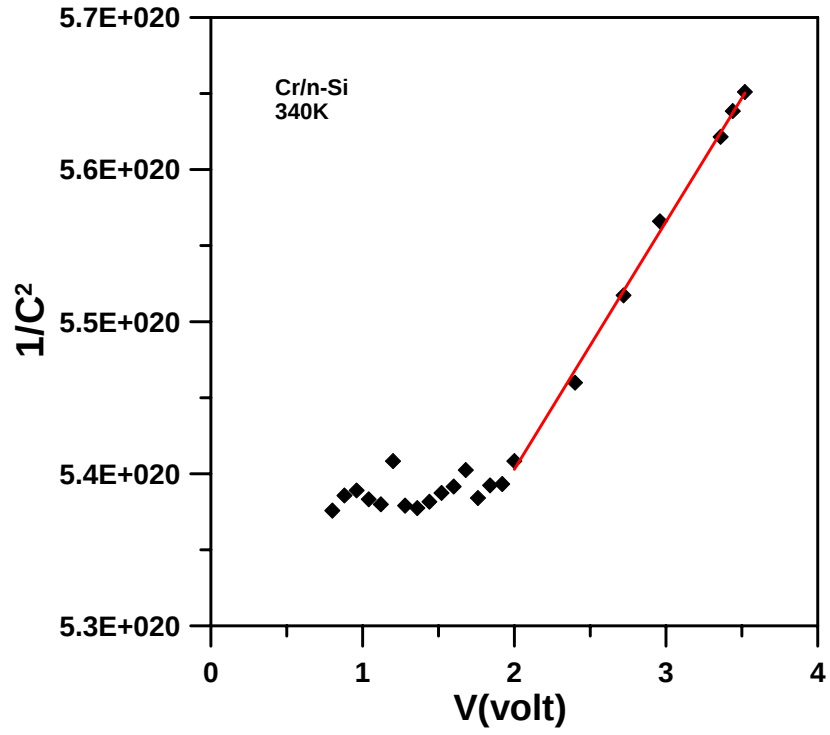
En iyi fotovoltaiik özellik gösteren numunenin (Cr/n-tipi Si eklemlerinden 3 nolu numune) sıcaklığa ve frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçümleri alındı. 1MHz'de alınan C-V ölçümlerinden katkılama miktarı (N_D) belirlendi. N_D katkılama miktarı Denklem (2.5) yardımıyla hesaplandı. Bariyer yüksekliği 1kHz'deki C-V grafiğinin maksimum noktasından elde edildi ve sonuçlarla Çizelge 4.6 oluşturuldu. Bu numunenin değişik sıcaklıklardaki ve 1MHz deki $(1/C^2) - V$ grafikleri Şekil 4.20-4.24'de ve 1kHz'deki C-V grafiği Şekil 4.25'te gösterilmektedir. Sadece 360 K sıcaklığında alınan C-V ölçümünden bariyer yüksekliği elde edildi, bu nedenle diğer sıcaklıklardaki C-V grafiklerine yer verilmedi.



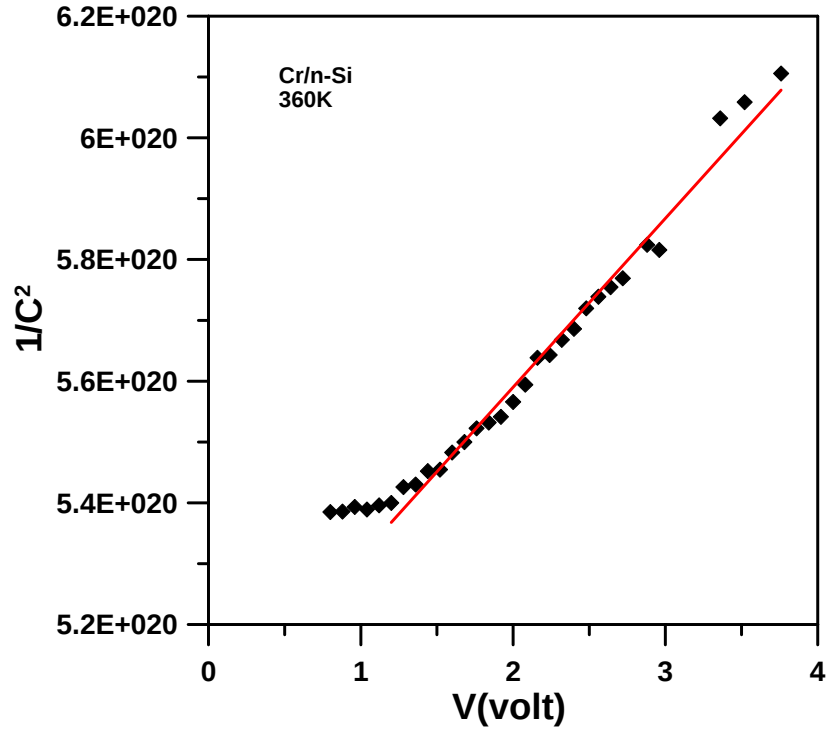
Şekil 4.20 300K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



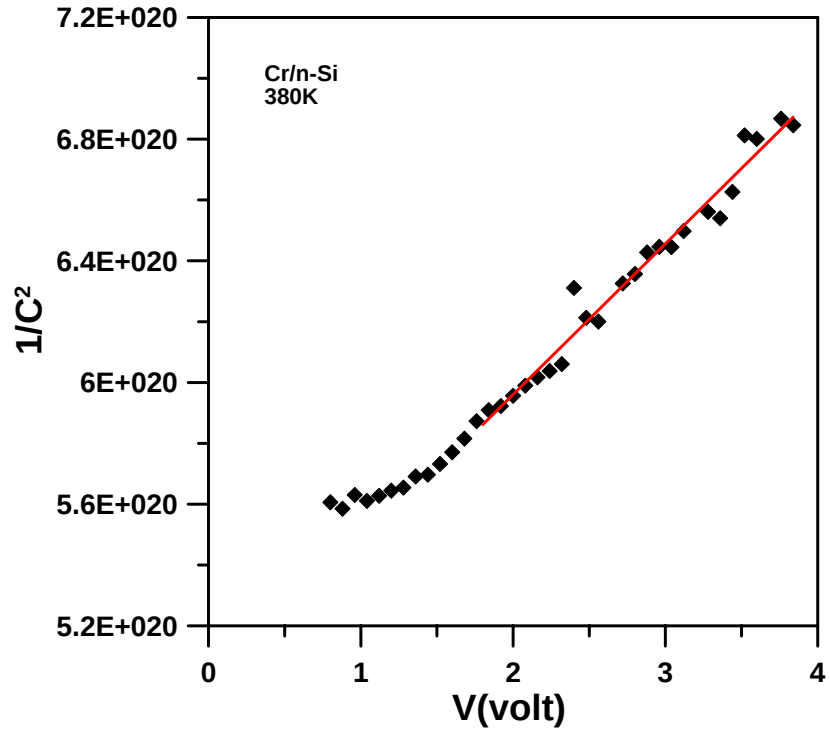
Şekil 4.21 320K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



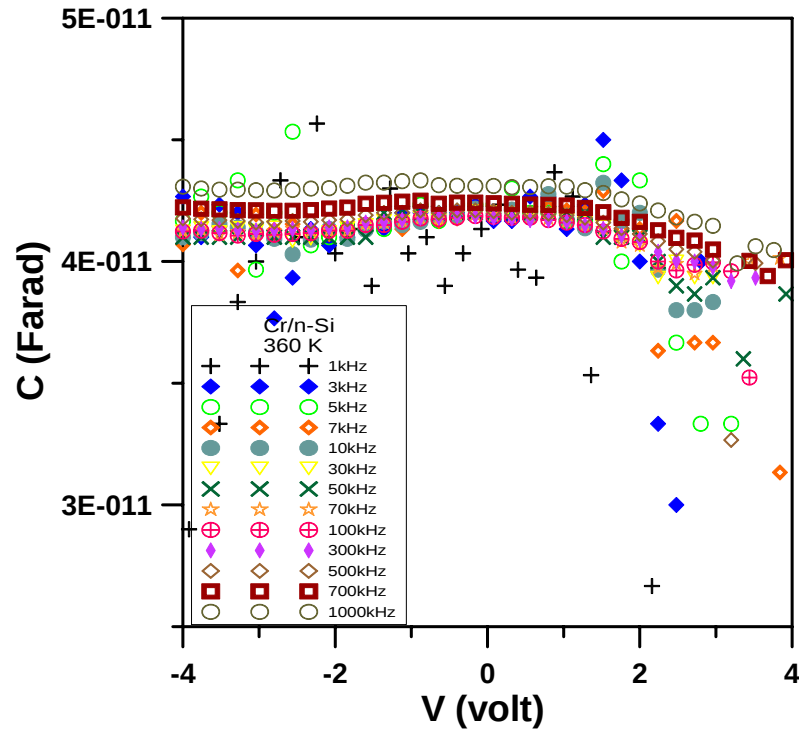
Şekil 4.22 340K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



Şekil 4.23 360K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



Şekil 4.24 380K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



Şekil 4.25 360K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği

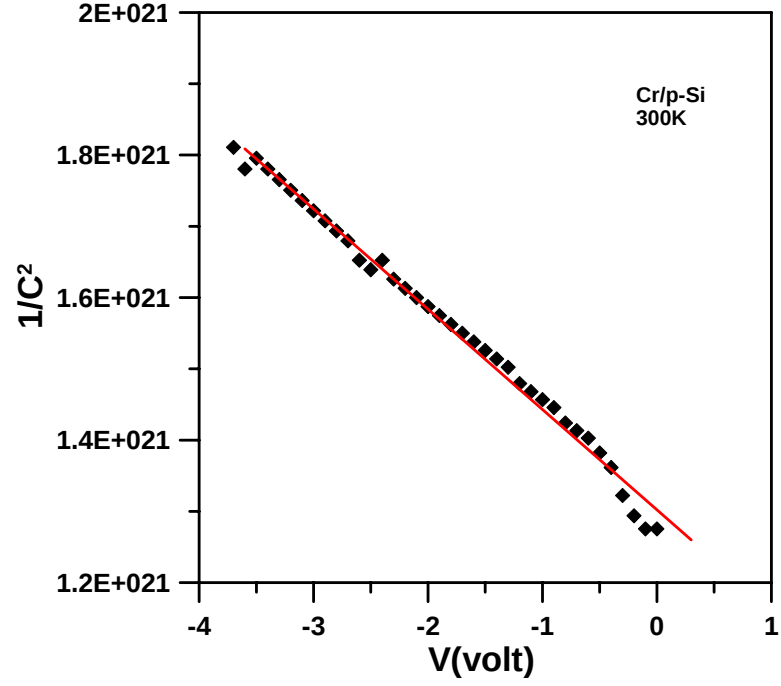
Çizelge 4.6 Cr/n-Si eklem için değişik sıcaklıklarda C-V datalarından elde edilen parametreler

Sıcaklık(K)	N_D (katkılama miktarı)	ϕ_{bn} (eV)(bariyer yüksekliği)
300	2.76×10^{14}	—
320	2.54×10^{15}	—
340	3.05×10^{15}	—
360	1.77×10^{15}	1.0
380	1.00×10^{15}	—

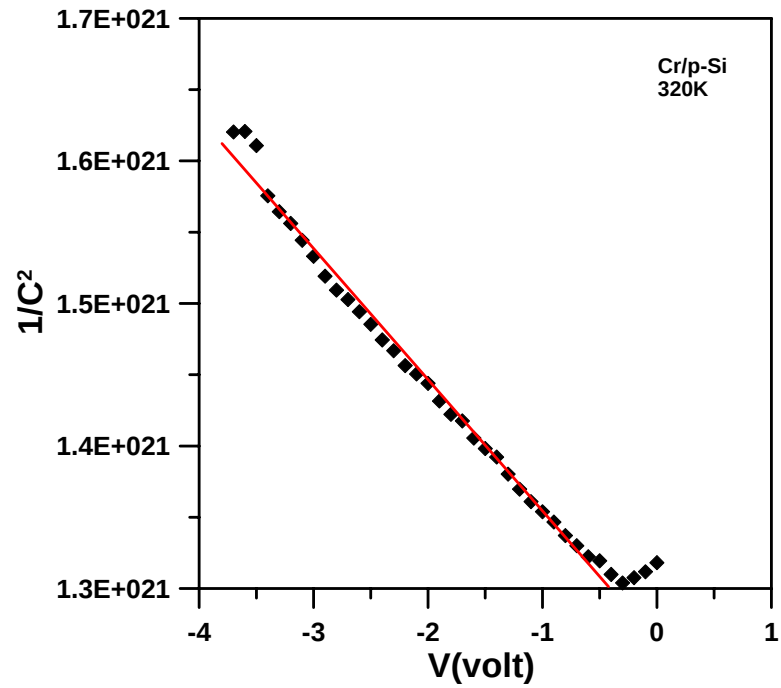
4.9 Cr/p-Si Eklemlerin Sıcaklığa Bağlı C-V Karakteristiği

En iyi fotovoltaiik özellik gösteren numunenin (Cr/p-tipi Si eklemlerinden 4 nolu numune) sıcaklığa bağlı kapasitans-gerilim ölçümleri alındı. C-V ölçümlerinden katkılama miktarı (N_D) (1 MHz), bariyer yüksekliği (ϕ_{bn}) (1kHz) parametreleri belirlendi. N_D katkılama miktarı Denklem (2.5) yardımıyla hesaplandı. Bariyer yüksekliği ise 1kHz’de alınan C-V

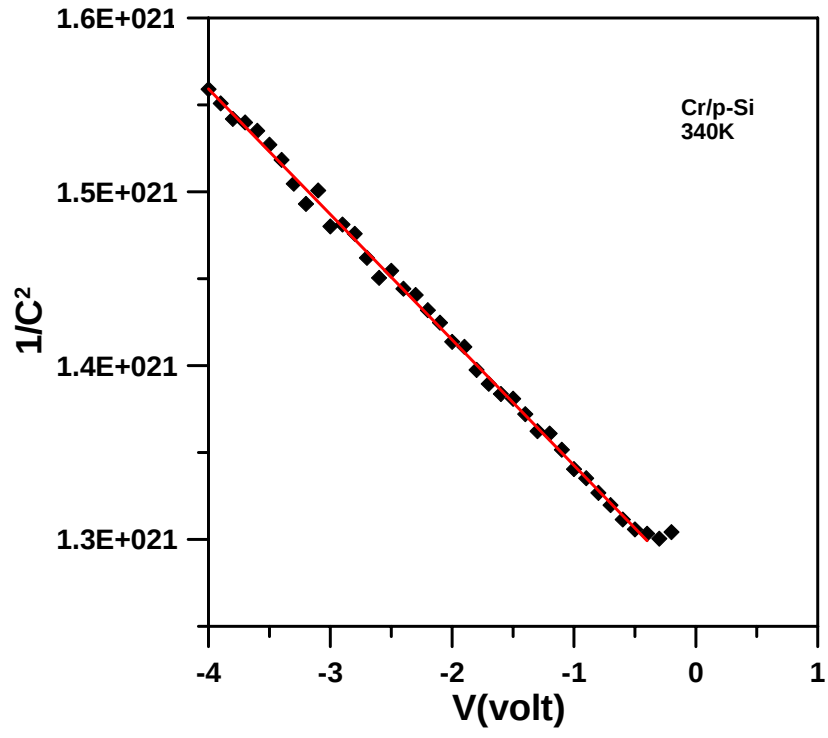
grafiğinin maksimum noktasından elde edildi ve değerler Çizelge 4.7'e işlendi. Bu numunenin değişik sıcaklıklarda ve 1MHz deki $(1/C^2)-V$ grafikleri Şekil 4.26-4.30'da, 1kHz'deki C-V grafikleri ise Şekil 4.31-4.35'te gösterilmektedir.



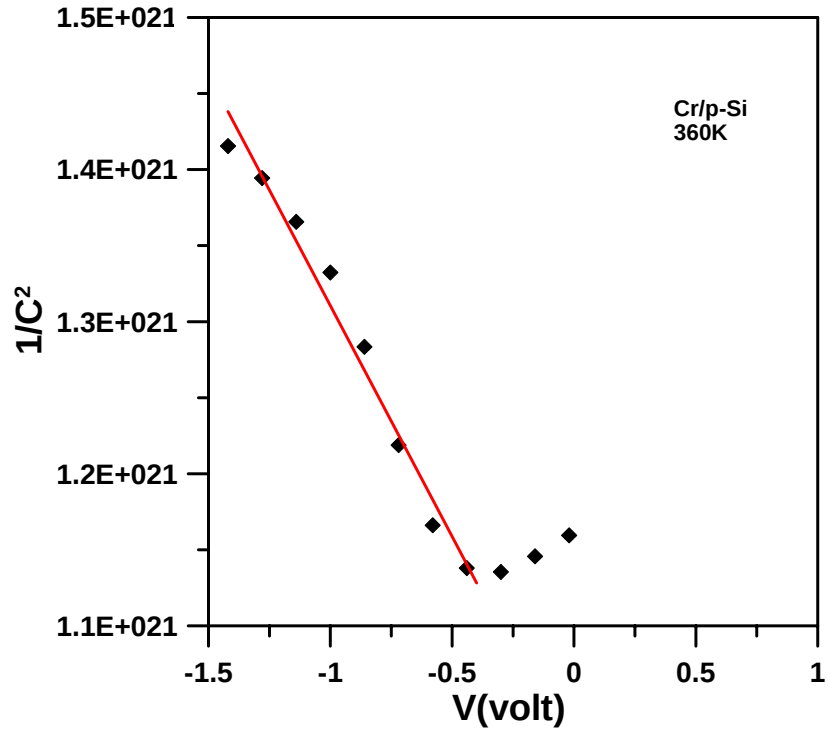
Şekil 4.26 300K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2)-V$ grafiği



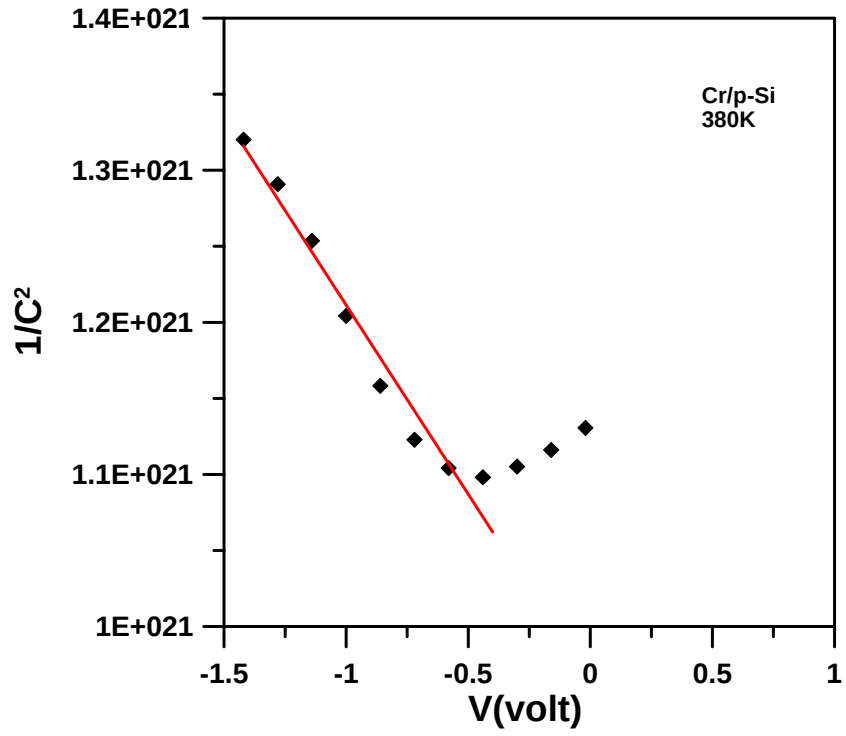
Şekil 4.27 320K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2)-V$ grafiği



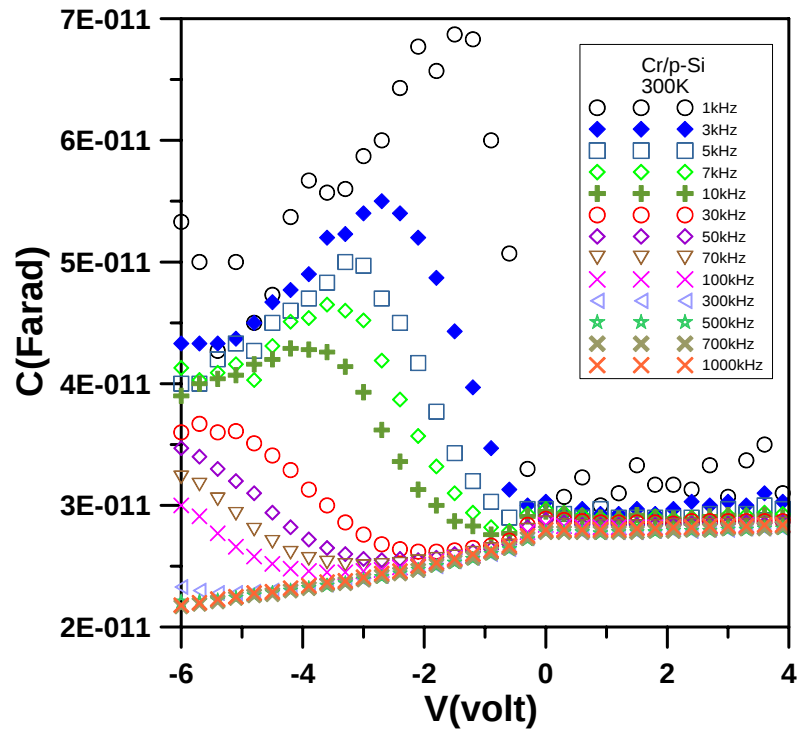
Şekil 4.28 340K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



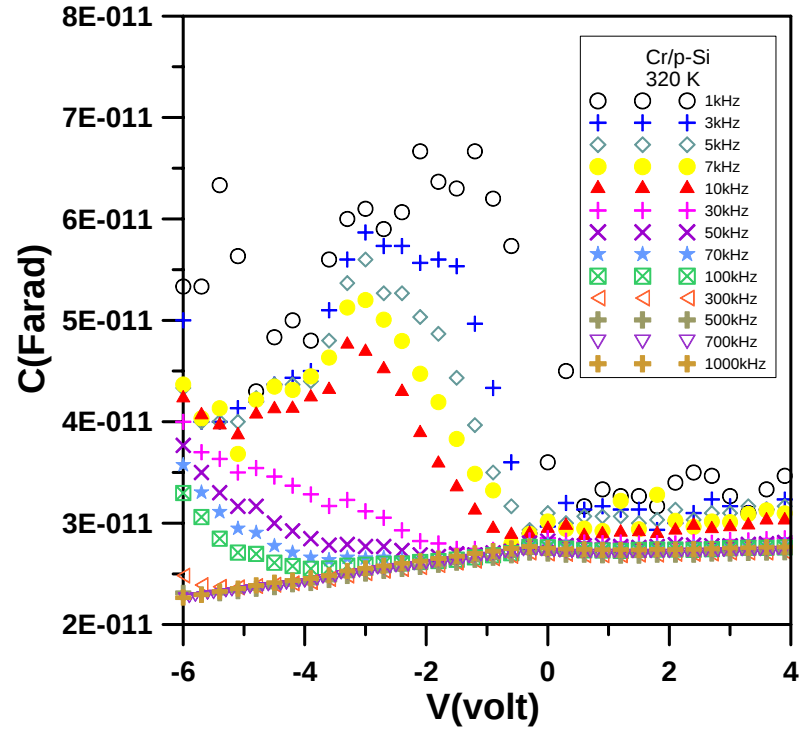
Şekil 4.29 360K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



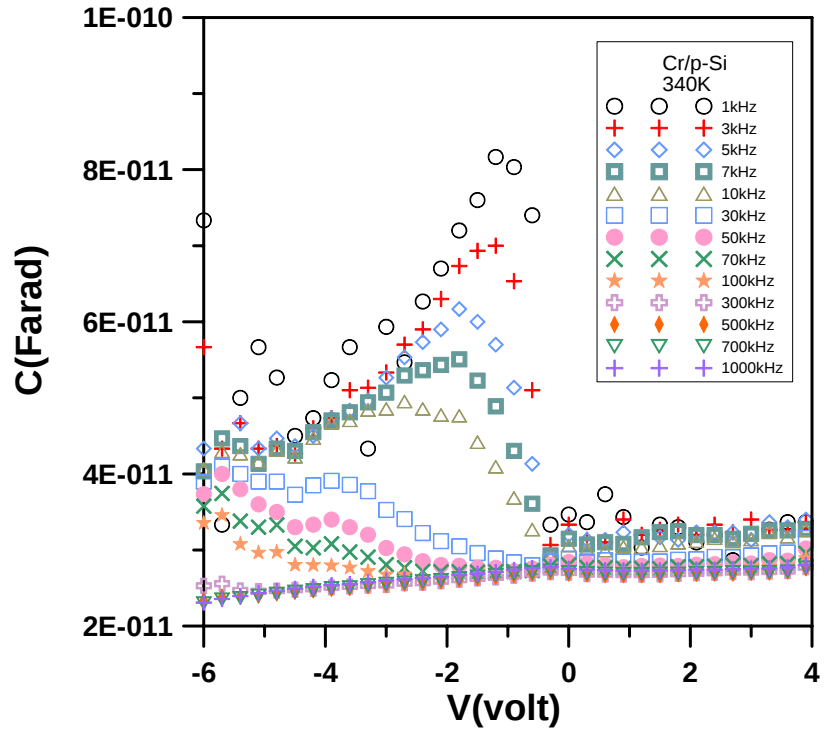
Şekil 4.30 380K sıcaklığında 1MHz frekansındaki $(1/C^2) - V$ grafiği



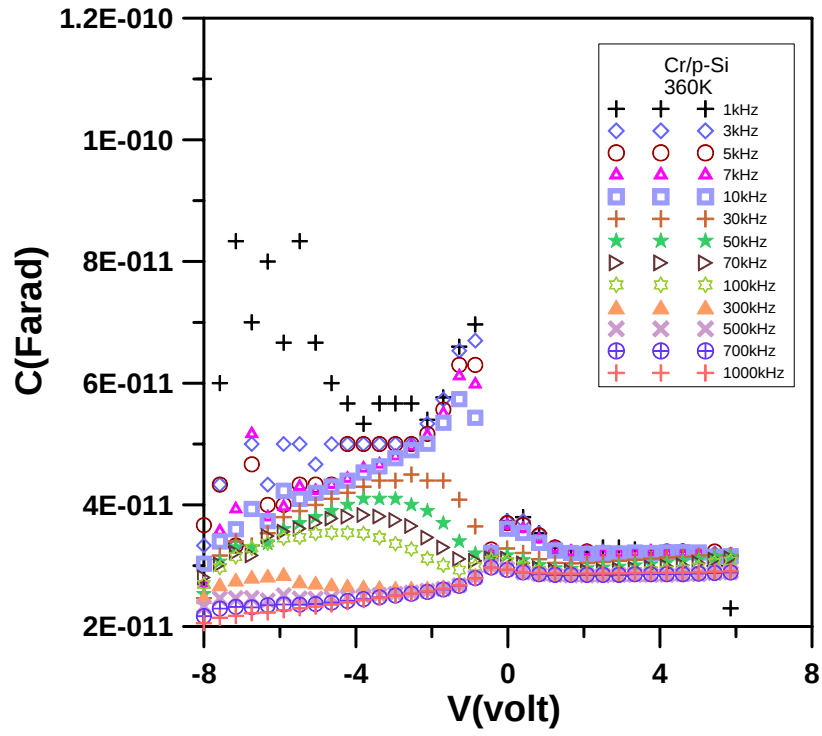
Şekil 4.31 300K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği



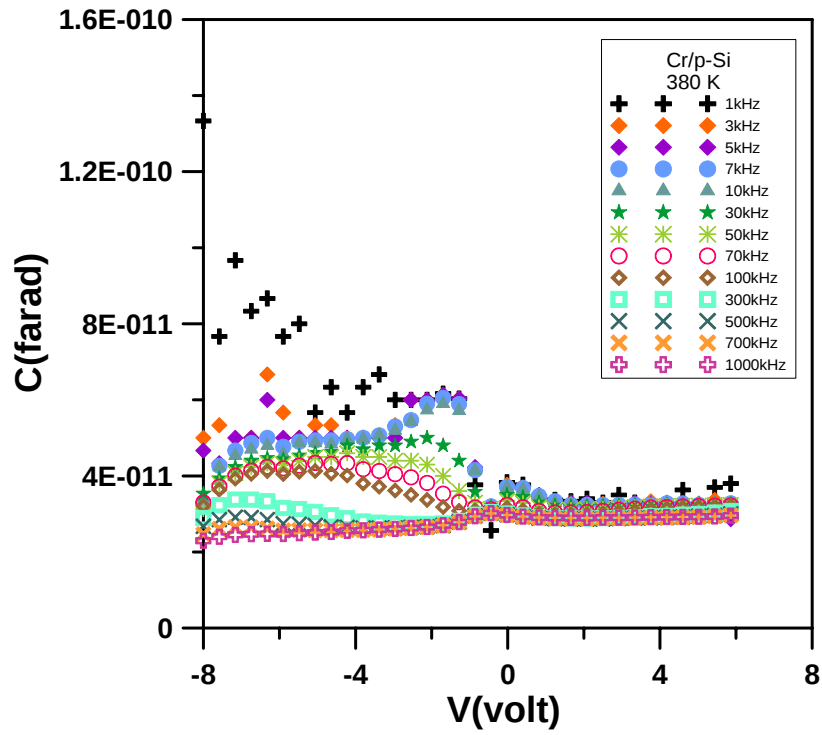
Şekil 4.32 320K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği



Şekil 4.33 340K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği



Şekil 4.34 360K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği



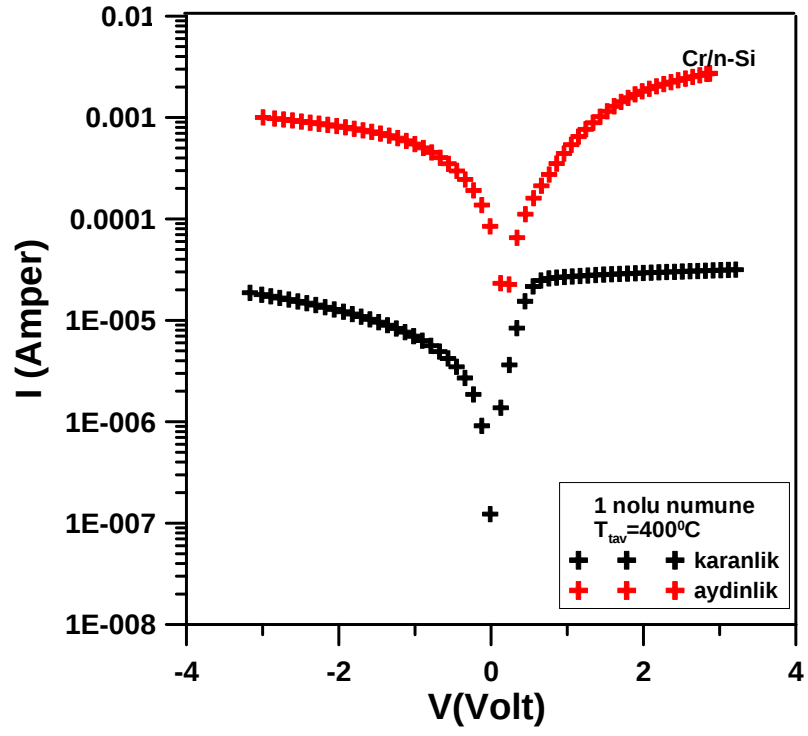
Şekil 4.35 380K sıcaklığında farklı frekanslardaki C-V grafiği

Çizelge 4.7 Cr/p-Si eklem için değişik sıcaklıklarda C-V datalarından elde edilen parametreler

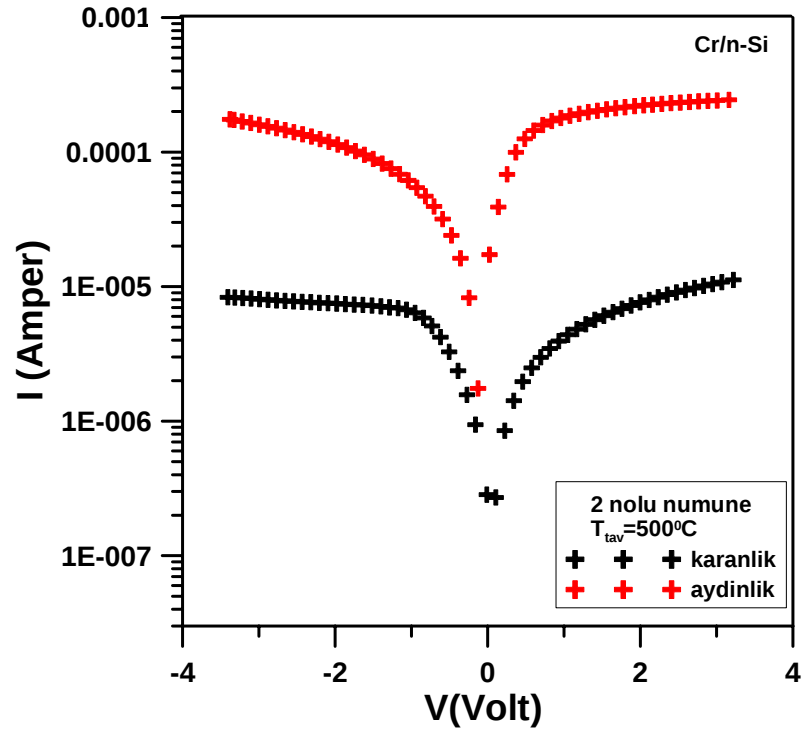
Sıcaklık(K)	N_D (katkılama miktarı)	ϕ_{bn} (eV)(bariyer yüksekliği)
300	3.54×10^{14}	1.5
320	5.39×10^{14}	1.2
340	6.88×10^{14}	1.1
360	1.52×10^{14}	0.87
380	1.80×10^{14}	—

4.10 Isıl İşlem Sonrası Cr/Si Eklemlerin I-V Karakteristiği

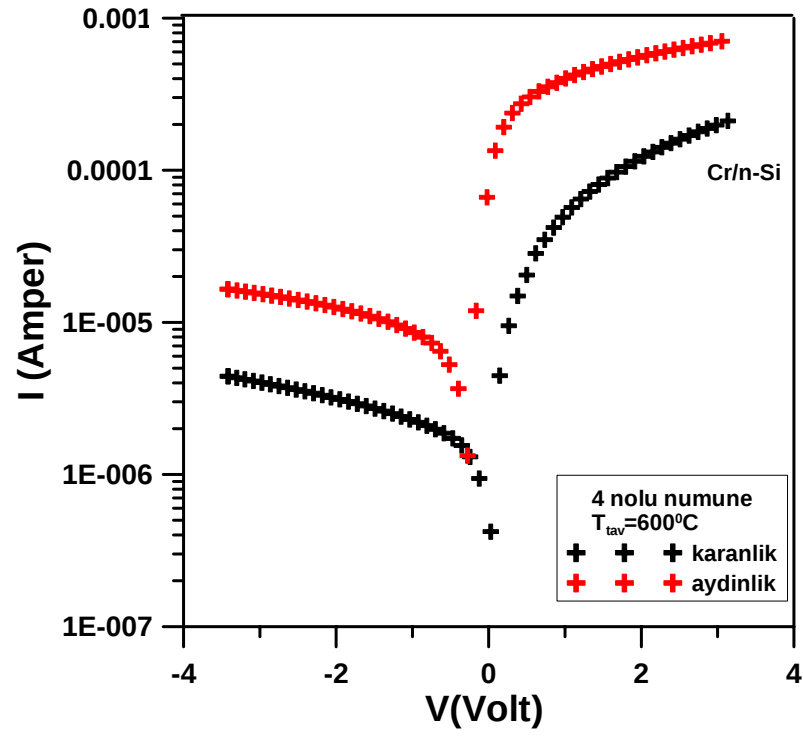
Cr/n-Si ve Cr/p-Si eklemler üç farklı sıcaklıkta 20'şer dakika tavlamaya tabi tutuldular. Tavlamanın yapılmasının amacı arayüzeyde bir $CrSi_2$ tabaka elde edebilmek idi. Alınan I-V ölçümlerine bakarsak yapıda bir değişiklik olduğunu yani arayüzeyde bir $CrSi_2$ tabaka oluştuğunu söyleyebiliriz. Tavlama sonrası oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümleri alındı ve bu ölçüm değerlerinden idealite ve bariyer yüksekliği hesaplamaları Denklem (2.35) ve Denklem (2.36) yardımıyla yapıldı. Elde edilen değerler Çizelge 4.8'da yer almaktadır. Karanlık ve aydınlıkta alınan I-V ölçümlerinden elde edilen grafikler, Şekil 4.36-4.41'de gösterilmiştir.



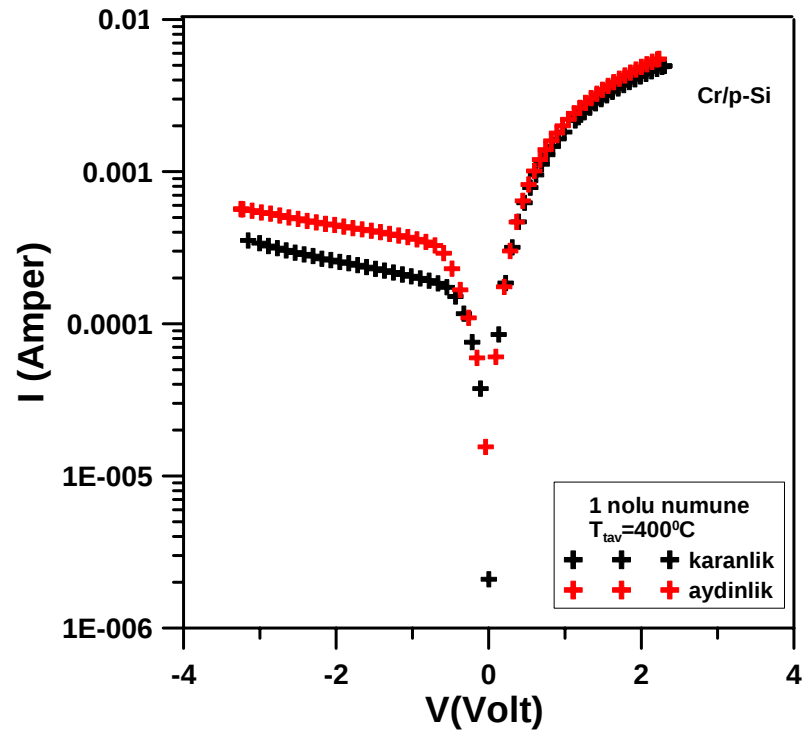
Şekil 4.36 Isıl işlem sonrası 1 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği



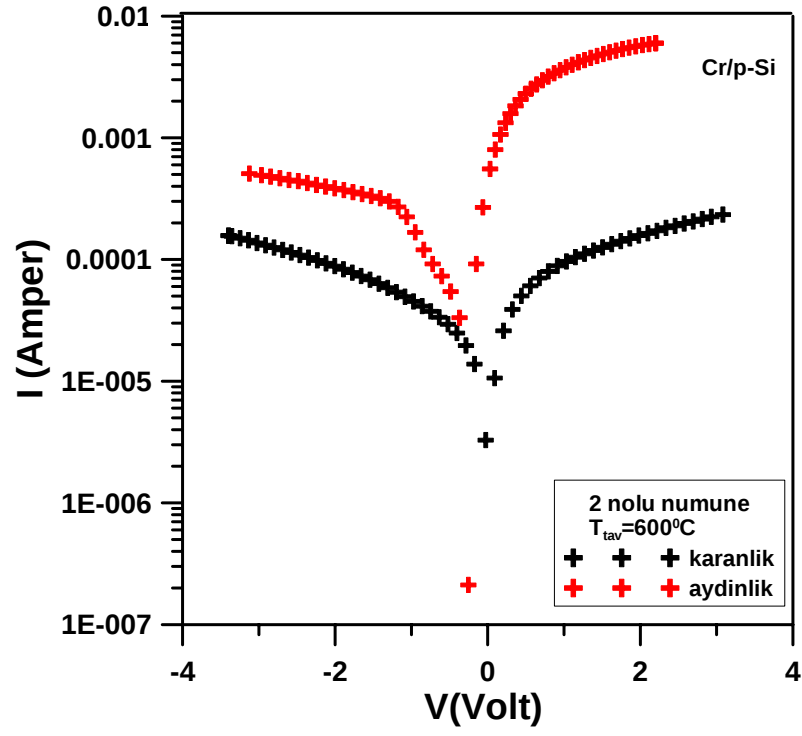
Şekil 4.37 Isıl işlem sonrası 2 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği



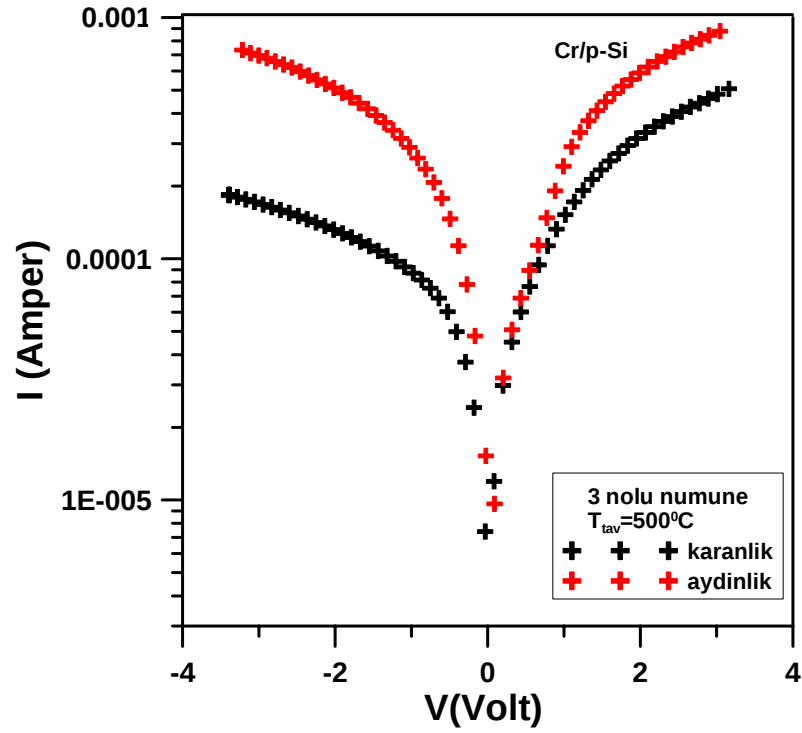
Şekil 4.38 Isıl işlem sonrası 4 nolu Cr/n-Si numunenin lnI-V grafiği



Şekil 4.39 Isıl işlem sonrası 1 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği



Şekil 4.40 Isıl işlem sonrası 2 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği



Şekil 4.41 Isıl işlem sonrası 3 nolu Cr/p-Si numunenin lnI-V grafiği

Çizelge 4.8 Cr/Si eklemlerin tavlama sonrası diyot parametreleri

Numune no	Tavlama sıcaklığı(°C)	η (idealite faktörü)	ϕ_{bn} (bar. yük.) (eV)
Cr/n-Si (1 nolu)	400	5.02	0.80
Cr/n-Si (2 nolu)	500	4.83	0.82
Cr/n-Si (4 nolu)	600	3.94	0.78
Cr/p-Si (1 nolu)	400	3.83	0.69
Cr/p-Si (2 nolu)	600	7.42	0.72
Cr/p-Si (3 nolu)	500	5.96	0.73

4.11 Fotovoltaik Özellikler

Cr/Si eklemlerin fotovoltaik özelliklerini incelemek için oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki akım-gerilim karakteristikleri incelendi. Aydınlıktaki akım-gerilim değerlerinin alınması için 100 mW gücündeki halojen lamba kullanıldı. Eklemlerin fotovoltaik parametreleri tavlama öncesinde ve tavlama sonrasında alınarak değişim gözlemlendi.

Çizelge 4.9 Cr/Si eklemlerin fotovoltaiik parametreleri

	Numune No	Tavlama Öncesi			Tavlama Sonrası			
		$I_{sc} (\mu A)$	$V_{oc} (mV)$	I_{ayd} / I_{kar}	Tavlama Sıcaklığı($^{\circ}C$)	$I_{sc} (\mu A)$	$V_{oc} (mV)$	I_{ayd} / I_{kar}
Cr/n-Si	1	13.0	327	45	400	66.2	181.2	63
	2	23.0	249	236	500	13.1	114	16
	3	25.2	366	4	—	—	—	—
	4	8.0	376	79	600	58.4	229	4
Cr/p-Si	1	15.7	285	298	400	2.01	6.64	1
	2	6.0	337	235	600	138.8	268	65
	3	9.9	280	98	500	10.8	61.6	4
	4	44.5	370	158	—	—	—	—

5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarla ilgili 1900'lü yıllardan günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle Schottky diyotlar mikroelektronik teknolojisinde yaygın kullanım alanı bulması ve üretiminin kolay olması ve maliyetinin ucuz olması nedeniyle halen yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu çalışmada saf Cr metali, p-Si(111) ve n-Si(100) altlıklar üzerine oda sıcaklığında elektron demeti buharlaştırma yöntemi kullanarak kaplandı ve Cr/n-Si ve Cr/p-Si metal-yarıiletken Schottky kontaklar elde edildi. Bu eklemlerin öncelikle oda sıcaklığında elektriksel özellikleri (akım-gerilim) incelenerek en iyi diyot karakteristiği ve fotovoltaiik özellik gösteren numunelerin sıcaklığa bağlı akım-gerilim ve kapasitans-gerilim değişimleri incelendi.

Cr/n-Si Schottky eklemının temel diyot parametrelerinin sıcaklığa bağılılığı, 300-380 K sıcaklık aralığında incelendi. Bu eklemlerin sırasıyla idealite faktörünün (η), bariyer yüksekliğinin(ϕ_{bn}) 1.65-1.14 ve 0.87-1.08 eV arasında sıcaklığa bağlı olarak değiştiği görüldü. Sıcaklığın artmasıyla, diyotun idealite faktörünün azalmasına karşılık bariyer yüksekliğinin arttığı belirlendi ve bu sonuçlar literatür ile uyumludur. İdealite faktörünün sıcaklığın artmasıyla ideal değere (1'e doğru) yaklaşması, diyot performansının iyileştiği anlamına gelir. Daha önceki çalışmalara göre idealite faktörünün metal-yarıiletken yapının arayüzey özellikleri arasında güçlü bağlantı olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkarak sıcaklığın artışı ile arayüzey durumlarının etkisinin iyileştiğinin söylenmesi mümkündür. Diyotun bariyer yüksekliğinin sıcaklığın artmasıyla yükselmesi zaten beklenen bir durumdur, çünkü idealite sabiti ($\eta=1$) taşıyıcıların bir bariyerden atlamasını öngörür. Aynı şekilde, Cr/p-Si eklemının temel diyot parametreleri (η , ϕ_{bp}) sırasıyla sıcaklığa bağlı olarak 1.63-1.46 ve 0.85-1.05 eV arasında hesaplandı. Cr/p-Si eklemlerin temel diyot parametrelerinin sıcaklığa bağımlılığı, Cr/n-Si eklemleriyle benzer sonuçlar göstermiştir.

Eklemlerin karanlıkta alınan akım-gerilim ölçümlerinde diyotların nispeten doğrultucu özelliğine sahip olduğu belirlendi. Eklemlerin doğrultma sabitlerinin (I_d/I_t) 10^2 civarında olduğu tespit edildi. Termoyonik emisyon modeli göz önünde bulundurularak, Cr/Si eklemlerin doğru yönde iletim mekanizmaları incelenmesi sonucunda düşük elektrik alan bölgesinde ($V_F < 0.5$ V) Cr/n-Si eklem için omik, Cr/p-Si eklem için Schottky alan emisyon iletim mekanizmasının geçerli olduğu görüldü. Yüksek elektrik alan bölgesinde ise ($V_F > 0.5$ V) her iki eklem için de SCLC iletim mekanizması geçerlidir. Sıcaklığa bağlı I-V sonuçları göz önünde bulundurulduğunda tünelleme mekanizmasının her iki elektrik alan bölgesinde etkin olduğu, yani aktivasyon enerjisinin sabit kaldığı (Şekil 4.17); ancak daha önceden

tuzaklanmış ve yüklü hale gelmiş kusurların kendilerinden sonra gelecek olanları güçleştirdiğinden gerilimin karesiyle (bazen daha da büyük) artmasına yani SCLC mekanizmasının ortaya çıkarmasına neden olur. Bir başka deyişle, gerilimin kuvveti incelenen tüm sıcaklıklar için ikiden büyük olması ve sıcaklık arttıkça kuvvetin azalma eğiliminde olması SCLC mekanizmasının temel karakteristiğidir.

Geleneksel yöntemle katkılama miktarı (N_A) ve oluşum potansiyelini saptamak için Cr/Si eklemlerden C-V karakteristikleri ölçülmüştür. Sabit sıcaklıklarda frekansa bağlı yapılan C-V ölçümlerinin beklenen karakteristikten farklı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.19-Şekil 4.23). Bu tür davranışların yani iletim modülasyonu (Sze M. S., 2007) azınlık yüklerinin katkısından kaynaklandığı literatürde açıklanmıştır. Bu nedenle bariyer yüksekliği hesabı farklı bir yol ile tespit edilmiştir. Bu yöntemde C-V grafiklerinin maksimum noktası bize bariyer yüksekliğini verir.

Işık altında alınan I-V ölçümlerinden Cr/Si Schottky eklemlerin genel olarak ışığa duyarlılık gösterdiği görüldü. Eklemlerin fotoduyarlılıkları hesaplandığında Cr/n-Si ve Cr/p-Si için sırasıyla $I_{ayd}/I_{kar} \sim 10$ ve 10^3 kat olarak bulundu. En yüksek fotovoltaiik parametreler ise; Cr/p-Si için $V_{oc}=370$ mV ve $I_{sc}= 44.5$ μ A olarak ölçüldü. Cr/n-Si için ise $V_{oc}=366$ mV ve $I_{sc}= 25.2$ μ A olarak belirlendi. Anlaşılacağı üzere Cr/p-Si Schottky diyotlar hem fotovoltaiik parametrelerinin yüksek olmasından dolayı hem de ters yön fotoduyarlılıklarının 10^3 kat olmasından dolayı, bu eklemlerin fotodiyot olarak kullanımlarının mümkün olabileceğini söyleyebiliriz.

Eklemlerin, ısıtıl işlemler neticesinde temel diyot özelliklerini kaybettiği yani idealite faktörünün arttığı, bariyer yüksekliğinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca bu ısıtıl işlemlerinin arayüzey durumlarının üzerinde farklı etkiler yaparak Cr/Si Schottky diyotların performanslarını direkt etkilediği açıkça görülmektedir. Belirgin bir şekilde, 400-500 °C'deki tavlama sonuçları bu yargıyı desteklerken, 600 °C'de yapılan tavlama sonucu diyot parametrelerinde herhangi bir iyileştirmeye neden olmamasına karşın; fotovoltaiik özelliklerinin hem 400-500 °C'deki tavlamadan hem de tavlama öncesi değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.. Bu da uygun tavlama sıcaklığı tespitinin önemini ortaya koyar, çünkü eklemlerin fotovoltaiik özelliklerinin iyileştirilmesiyle bu eklemlerin ilerisi için fotovoltaiik Schottky güneş pili olarak kullanımına imkan sağlar.

Bu çalışmada, hem n-Si(100) hem de p-Si(111) altlıklar üzerine oda sıcaklığında elektron demeti buharlaştırma yöntemiyle Cr/Si Schottky diyotlar başarıyla üretildi. Elektriksel performansları ve kullanım alanları ortaya konuldu.

KAYNAKLAR

- Aboelfotoh M. O., (1988), "Electrical Characteristics of Ti/Si(100) Interfaces", J. Appl. Phys. 64, 4046-4055
- Anıltürk Ö. S., Turan R., (1999), "Temperature Dependence of a CrSi₂ Schottky Barrier on n-type and p-type Si", Semiconductor Science Technology 14, 1060-1064
- Benouattas N., Halimi R., Bouabellou A., Mosser A., (2001) "Effect of Implanted Phosphorus on Silicide Formation in the Cr/Si(111) System", Thin Solid Films 385, 61-65
- Benouattas N., Tamaarat B., Bouabellou A., Halimi R., Mosser A., (1999), "Electrical Properties of Cr/Si(p) Structures", Solid State Electronics 43, 439-446
- Caferov T., (1998), "Yarıiletken Fiziği 1", Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul
- Caferov T., (2000), "Katıhal Elektroniği", Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul
- Galkin N.G., Konchenko A.V., Vavanova S.V., Maslov A.M., Talanov A.O., (2001) "Transport, Optical and Thermoelectrical Properties of Cr and Fe Disilicides and Their Alloys on Si(111)", Applied Surface Science 175-176, 299-305
- Jürgen H., Werner H., Güttler H., (1991), "Barrier Inhomogeneities at Schottky Contacts", J. Appl. Phys. 69, 1522-1533
- Karataş Ş., Altındal Ş., (2005), "Zn/p-Si Schottky Diyotlarda Temel Elektriksel Parametrelerin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi", KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi 8, 26-30
- Kim K.H., Lee J. D., Lee J.J., Choi C. K., Lee J. Y., Lee Y. P., (1998) "The Growth and the Electrical Properties of Epitaxial CrSi₂ Films Prepared on Si(111) Substrates", Journal of the Korean Physical Society 33,71-75
- Kumar S., Katharria Y.S., Kumar S., Kanjilal D., (2006), "Temperture-Dependent Barrier Characteristics of Swift Heavy Ion Irradiated Au/n-Si Schottky Structure", Journal of Applied Physics 100
- Li M., Anderson W. A., (2007), "Si-based Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors With Various Design Modification", Solid State Electronics 51, 94-101
- Ohring M., (1992), "The Materials Science of the Thin Films", Academic Pres Inc., New Jersey
- Sze M. S., Kwog K. N., (2007), "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- Tataroğlu A., Altındal Ş., (2008), "Analysis of Interface States and Series Resistance of MIS Schottky Diodes Using the Current-Voltage (I-V) Characteristics", Microelectronic Engineering 85, 233-237
- Turan R., Akman N., (1993), "Schottky Barrier Height of CrSi₂-Si Junctions", Semiconductor Science Technology 8, 1992-2002

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	19.08.1981	
Doğum yeri	Malatya	
Lise	1995-1999	İskenderun Süper Lise
Lisans	2000-2004	Yıldız Üniversitesi Fen-Edebiyat Fak. Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	2005-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2006-2007	Hobim Bilgi İşlem A.Ş.
2007-Devam ediyor	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi

Ulusal Bildiri(ler)

A. E. Bulgurcuoğlu, P. Gökdemir, D. Yılmaz, O. Özdemir, B. Tatar, K. Kutlu, (2008), “Cr/Si Schottky Kontaktların Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi”, II. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, ESOGÜ Press, Eskişehir, 22

Uluslararası Bildiri(ler)

A. E. Bulgurcuoğlu, P. Gökdemir, D. Yılmaz, O. Özdemir, B. Tatar, K. Kutlu, (2008), “Electrical Properties of Cr/Si Schottky Diodes Through I-V-T Measurement”, Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi, 375

Uluslararası Yayın(lar)

B. Tatar, A. E. Bulgurcuoğlu, P. Gökdemir, D. Yılmaz, O. Özdemir, K. Kutlu, (2008), “Electrical and Photovoltaic Properties of Cr/Si Schottky Diodes”, International Journal of Hydrogen Energy (accepted for publication)