

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

**Au/PANI/p-Si/Al ORGANİK/İNORGANİK YARIİLETKEN DİYOTLARIN
AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Mehmet Nurullah SEÇUK
DANIŞMAN: Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ

VAN – 2011

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİKANABİLİM DALI

**Au/PANI/p-Si/Al ORGANİK/İNORGANİK YARIİLETKEN DİYOTLARIN
AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Mehmet Nurullah SEÇUK

VAN – 2011

Bu çalışma Yüzüncü Yıl Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından 2010-FBE-YL129 numaralı proje olarak desteklenmiştir.

KABUL ve ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ danışmanlığında, Mehmet Nurullah SEÇUK tarafından hazırlanan “**Au/PANI/p-Si/Al Organik-İnorganik Yarıiletken Diyotların Akım-Voltaj Karakteristikleri**” isimli bu çalışma 24/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR

İmza:

Üye: Prof. Dr. Mehmet TUNÇ

İmza:

Üye: Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun/...../..... gün ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Fatih Çelen
Enstitü Müdürü

ÖZET

Au/PANI/p-Si/Al ORGANİK/İNORGANİK YARIİLETKEN DİYOTLARIN AKIM-VOLTAJ KARAKTERİSTİKLERİ

SEÇUK, M. Nurullah

Yüksek Lisans Tezi, Fizik

Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ

Haziran 2011, 70 sayfa

Bu çalışmada [100] doğrultulu p-tipi silisyum tek kristalinin arka tarafına alüminyum (Al) buharlaştırılarak omik kontak yapıldı. Ön yüzüne ise, oda sıcaklığında ($T = 300$ K), üç farklı polianilin çözeltisi (2 mg/ml'lik Aldrich emeraldin tuzu 530565 ve hazır halde Aldrich emeraldin tuzu 650013 ile Aldrich emeraldin tuzu 649996 çözeltileri) doğrudan ilave edilip kurumaya bırakılarak organik/inorganik p-n eklem diyotlar üretildi. Numuneler A, B ve C diye isimlendirildi. Üretilen PANI/p-Si/Al yapısında PANI filminin üzerine, ölçüm alabilmek için vakum buharlaştırma yoluyla $r = 0.05$ cm yarıçapında %99.99'luk altın (Au) üst omik kontaklar yapıldı ve üretilen p-n eklem diyotların akım-voltaj (I-V) ölçümleri alındı. Akım-voltaj ölçüm verileri kullanılarak çizilen $\ln I$ -V grafiklerinden, üretilen PANI/p-Si kontakların doğrultucu özellik gösterdiği tespit edildi. Akım-voltaj karakteristikleri ve Cheung&Cheung fonksiyonları kullanılarak tüm kontaklara ait idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı. Numunelerin üst kontaklı noktaları için n ve Φ_b değerlerinin sırasıyla 1.08-5.81 ve 0.53 eV-0.81 eV aralıklarında olduğu belirlendi. R_s değerleri geniş bir yelpazeye dağılmasına karşın, bir kontak için alınan ölçümler arası fark en fazla %20 oldu. Numunelerden A ve C'ye ait her bir kontak için farklı yollarla hesaplanan Φ_b değerleri birbirine oldukça yakın çıktı. En iyi idealite faktörü sonuçları C numunesinde elde edildi. Seri dirençler açısından numunelerde benzer farklar gözlemlendi.

Her üç numunenin kontakları göz önüne alındığında en iyi neticeler C numunesinde (Aldrich emeraldin tuzu 649996 ile) tespit edildi. Bu durum Aldrich emeraldin tuzu 649996 çözeltisindeki parçacık boyutunun 20 nm'nin altında olmasına atfedilebilir. Tüm bunlar dikkate alınınca, Au/PANI/p-Si/Al yapısının iyi bir doğrultucu özellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra üretilen PANI/p-Si kontaklar, organik/inorganik (O/İ) yarıiletken doğrultucu kontak yerine arayüzey (yalıtkan) tabakalı organik/yalıtkan/inorganik (OYİ) yarıiletken doğrultucu olarak değerlendirilebilirler.

Anahtar Kelimeler: Doğrultucu, PANI/p-Si, I-V karakteristikleri, organik/inorganik kontak

ABSTRACT

CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF Au/PANI/p-Si/ Al ORGANIC/INORGANIC SEMICONDUCTING DIODES

SEÇUK, M. Nurullah

MSc, Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

June 2011, 70 pages

In this study, ohmic contact was prepared by evaporation of Aluminum onto back side of p-Si [100] single crystal while onto the front side three different PANI solutions (Aldrich emeraldine salt 530565 solution with density 2mg/ml, Aldrich emeraldine salt 650013 ve Aldrich emeraldine salt 649996 solutions as obtained) were directly added and left to dry at room temperature (300 K) to produce organic/inorganic p-n junction diodes. Samples were labelled as A, B and C. Gold contacts of radii $r = 0.05$ cm were made onto PANI side of PANI/p-Si structure by vacuum evaporation and current-voltage (I-V) measurements were employed. Values of ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) values of all contacts were calculated by using I-V characteristics and Cheung&Cheung functions. Values of n and Φ_b of the contacts were found as in the intervals of 1.08-5.81 and 0.53 eV-0.81 eV respectively. R_s results were dispersed to a wide spectrum while variation between different measurements of the same contact was approximately about % 20 at max. Φ_b values that were calculated for each contact by different ways are close for each contact in samples A and C. Differences between calculated values of series resistances of all contacts are similar for samples A, B and C. Best results were gathered from the sample C which was prepared with Aldrich emeraldine salt 649996. That was attributed to small particle size (smaller than 20 nm) of Aldrich emeraldine salt 649996. Concerning all the

statements above it can be stated that Au/PANI/p-Si/Al structure is a good rectifier. Moreover, PANI/p-Si structure can be treated as organic/insulating/inorganic rectifier instead of organic/inorganic rectifying contact.

Key words: Rectifier, PANI/p-Si, I-V characteristics, organic/inorganic contact

ÖN SÖZ

Modern çağın vazgeçilmezi olan yarıiletken teknolojisinin merkezinde doğrultucu kontaklar yer almakta ve bu sahaya ait gelişmeler gittikçe hız kazanmaktadır. Başlangıç itibariyle tamamen inorganik kökenli olan bu teknoloji, zaman içerisinde daha ucuz, daha kolay ve daha bol üretilebilir, daha esnek, çevreye daha uyumlu ve az zararlı olan organik/inorganik maddelere doğru kaymış ve günümüzde bu tarzda ciddi çalışmalar sürmektedir. Organik/inorganik doğrultucu kontaklar gelecek adına ümit verici olup, dünyanın enerji ihtiyacının karşılanması noktasında, güneş enerjisinin daha fazla rol alması için ana unsur olarak görülmektedir. Hem ekonomik olması ve hem de kolay üretilebilir olması itibariyle organik/inorganik doğrultucular, gelişen teknolojiye ayak uydurmaya çalışan ülkemiz için bu sahada dışa bağımlılıktan kurtulma adına da önemli bir alan gibi durmaktadır.

Bu çalışmada bir iletken organik madde olan polianilinin değişik çözeltileri ile oluşturulmuş organik/inorganik doğrultucu kontaklara ait akım voltaj karakteristikleri incelendi.

Bu çalışma sırasında desteğini esirgemeyen hocam Doç. Dr. Cabir TEMİRCİ'ye, tezin hazırlanması ve kontrolü aşamasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen araştırma görevlisi arkadaşlarım Dr. Arife GENCE-İMER'e, Abuzer YAMAN'a ve Ömer Faruk ÖZDEMİR'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Çalışmaların yoğunlaştığı zamanlarda fedakârlıklarını esirgemeyip anlayışla davranan aileme minnet ve şükranlarımı ifade etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışmaya yüksek lisans tezi projesi olarak (2010-FBE-YL129 numaralı) mali destek sağlayan Yüzüncü Yıl Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	3
3. TEORİK BİLGİ	6
3.1. Giriş	6
3.2. p-n Eklemler	13
3.2.1. Homo Eklemler	19
3.2.2. Hetero Eklemler	20
3.3. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlar	21
3.3.1. Metal/n-tipi Doğrultucu (Schottky) Diyotlar	21
3.3.2. Metal/n-tipi Omik Kontaklar	27
3.3.3. Metal(Dogrultucu)/n-Tipi Yarıiletken/Metal(Omik) Yapı	28
3.3.4. Metal/p-tipi Doğrultucu Schottky Diyotlar	29
3.3.5. Metal/p-tipi Omik Kontaklar	33
3.3.6. Metal(Omik)/p-tipi Yarıiletken/Metal(Dogrultucu) Yapı	35
3.3.7. Schottky Kontaklar ile p-n Eklemlerin Karşılaştırılması	35
3.4. Schottky Kontaklarda Akım Taşıma Teorileri	37
3.4.1. Termiyonik Emisyon Teorisi	37
3.4.2. Difüzyon Teorisi	38
3.4.3. Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi	39
3.5. Akım-Voltaj Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	40
3.5.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	41
3.5.2. Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	43
4. MATERYAL ve YÖNTEM	47
4.1. Giriş	47
4.2. Numunelerin Temizlenmesi ve Hazırlanması	47
4.2.1. p-Si [100] Kristalinin Kimyasal Olarak Temizlenmesi	47
4.2.2. p-Si [100] Kristaline Alüminyum (Al) Omik Kontak Yapılması	48
4.2.3. p-Si [100] Kristaline Doğrudan PANI İlavesi ile Doğrultucu Kontak Yapılması	49
4.2.4. PANI/p-Si'a Altın (Au) Üst Kontak (Omik) Yapılması	50
4.3 Ölçüm Alma	51

5. BULGULAR	52
5.1. Akım-Voltaj (I-V) Ölçümlerinin Kullanılması	52
5.2. Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması	56
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	63
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Polianilinin ana yapısı ($m + n = 1$ ve x : polimerleşme derecesi).	2
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontaklarda I-V ilişkisinin sembolik gösterimi.	6
Şekil 3.2. a) İletkenlerin, b) Yarıiletkenlerin, c) Yalıtkanların bant yapıları.	7
Şekil 3.3. a) Yarıiletken veya yalıtkanın kristal modelinde enerji-bant diyagramı. b) Saf yarıiletken için Fermi dağılım fonksiyonunun enerjiye göre değişimi (T: Kelvin cinsinden).	9
Şekil 3.4. Katkısız (saf) yarıiletkenden silisyum kristali için atomların ve atomlar arası bağların yapısının sembolik gösterimi.	9
Şekil 3.5. Yarıiletkenlerde elektron-hol çifti oluşumunun sembolik gösterimi.	10
Şekil 3.6. n-tipi katkılı yarıiletkenin bağ yapısının sembolik gösterimi.	10
Şekil 3.7. n-tipi yarıiletkenin bant yapısı.	11
Şekil 3.8. p-tipi katkılı yarıiletkenin bağ yapısının sembolik gösterimi.	11
Şekil 3.9. p-tipi yarıiletkenin bant yapısı.	11
Şekil 3.10. Silisyum altlık üzerine yapılmış bir p-n eklemının sembolik çizimi.	13
Şekil 3.11. Bir p-n eklemının bölgeleri ile bu bölgelerdeki taşıyıcı konsantrasyonlarının sembolik çizimi.	14
Şekil 3.12. p-n eklemde enerji bant yapısı ve Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi.	15
Şekil 3.13. İdeal bir p-n eklem (diyota) ait akım yoğunluğu-voltaj karakteristiği.	15
Şekil 3.14. Bir p-n eklemde ait I-V grafiğinin bölgelerinin sembolik çizimi.	16
Şekil 3.15. p-n eklemde: a) Doğru beslem, b) Ters beslem.	16
Şekil 3.16. Bir p-n eklemının arınma bölgesinde yük, elektrik alan ve voltaj değişiminin dış elektrik alan olmadığı durum için sembolik gösterimi.	17
Şekil 3.17. Bir p-n eklemde uzay yükü bölgesinin sembolik gösterimi.	17
Şekil 3.18. Termal dengeye ulaşmış bir p-n eklemde, dış elektrik alan yokluğunda enerji-bant yapısının eklem bölgesinde bükülmesi, Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi, engel potansiyelinin teşekkülü.	18
Şekil 3.19. Ters beslem, sıfır beslem (dış elektrik alan yok) ve doğru beslemde p-n eklemının uzay yükü (arınma) bölgesinin ve enerji-bant seviyelerinin durumunun sembolik gösterimi (Neamen, 2009).	18
Şekil 3.20. p-n homo eklemde enerji bant yapısı.	19
Şekil 3.21. p-n homo eklemde enerji bant yapısının sembolik gösterimi: a) Eklem oluşmadan önce, b) Eklem oluşuktan sonra.	19
Şekil 3.22. p-n hetero eklemde enerji bant yapısı.	20
Şekil 3.23. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakta önce, b) Kontakta sonra termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için, d) Ters beslem için.	22
Şekil 3.24. Metal/n-tipi kontakta voltaj uygulanmadan, termal denge durumunda oluşan birbirine eşit ve zıt yönlü akımlar (Doyma akımları).	23
Şekil 3.25. Metal/n-tipi doğrultucu Schottky diyotta: a) Doğru beslem b) Ters beslem.	24
Şekil 3.26. Metal/n-tipi kontağa doğru beslem uygulandığında oluşan akımlar.	24

Şekil 3.27. Metal/n-tipi y.i. kontağa ters beslem uygulandığında oluşan akımlar.	26
Şekil 3.28. Metal/n-tipi yarıiletken omik Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için, d) Ters beslem için.	27
Şekil 3.29. Bir diyotun oluşumunda yarıiletkenin iki tarafının bant yapısının sembolik olarak gösterimi.	28
Şekil 3.30. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için ve ters beslem için.	30
Şekil 3.31. Metal/p-tipi kontakta voltaj uygulanmadan, termal denge durumunda oluşan birbirine eşit ve zıt yönlü akımlar (Doyma akımları).	30
Şekil 3.32. Metal/p-tipi doğrultucu Schottky diyotta: a) doğru beslem, b) ters beslem.	31
Şekil 3.33. Metal/p-tipi y.i. kontağa doğru beslem uygulandığında oluşan akımlar.	31
Şekil 3.34. Metal/p-tipi y.i. kontağa ters beslem uygulandığında oluşan akımlar.	32
Şekil 3.35. Metal/p-tipi yarıiletken omik Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için ve ters beslem için.	34
Şekil 3.36. Bir diyotun oluşumunda yarıiletkenin iki tarafının bant yapısının sembolik olarak gösterimi.	35
Şekil 3.37. Schottky doğrultucu kontak ile p-n eklemlerinin doğru beslem akımlarının temsili karşılaştırılması.	36
Şekil 4.1. Numunelerde üst Au kontakların oluşturulması için kullanılan delikleri 1mm çaplı maske.	51
Şekil 5.1. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın lnI-V grafikleri	53
Şekil 5.2. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın lnI-V grafikleri	54
Şekil 5.3. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın lnI-V grafikleri	54
Şekil 5.4. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın $[dV/(d\ln I)]$ -I grafikleri	56
Şekil 5.5. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın $[dV/(d\ln I)]$ -I grafikleri	57
Şekil 5.6. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın $[dV/(d\ln I)]$ -I grafikleri	57
Şekil 5.7. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın H(I)-I grafikleri	59
Şekil 5.8. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın H(I)-I grafikleri	59
Şekil 5.9. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın H(I)-I grafikleri	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları (E_g)	8
Çizelge 5.1. A numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	55
Çizelge 5.2. B numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	55
Çizelge 5.3. C numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	55
Çizelge 5.4. A numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)	57
Çizelge 5.5. B numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)	58
Çizelge 5.6. C numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)	58
Çizelge 5.7. A numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	60
Çizelge 5.8. B numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	60
Çizelge 5.9. C numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)	60
Çizelge 5.10. A, B ve C numunelerine ait kontaklar için için I-V karakteristikleri, Cheung&Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

I	Akım
V	Potansiyel fark
Au	Altın
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Fe	Demir
Si	Silisyum
Ge	Germanyum
GaAs	Galyum arsenik
InP	İndiyum fosfat
E_F	Fermi enerji seviyesi
$f(E)$	Fermi dağılım fonksiyonu
E_g	Yasak enerji aralığı
E_c	İletim bandının tabanının enerji seviyesi
E_v	Valans bandının tavanının enerji seviyesi
GaP	Galyum fosfat
AlSb	Alüminyum antimonit
GaSb	Galyum antimonit
χ_s	Elektron yatkınlığı
Φ	İş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
T	Sıcaklık
n	Elektron konsantrasyonu
p	Hol konsantrasyonu
n_i	Katkısız yarıiletkende taşıyıcı oranı
N_D	Birim hacme düşen donör konsantrasyonu
N_A	Birim hacme düşen akseptör konsantrasyonu
w	Uzay yükü bölgesinin kalınlığı
I_0	Doyma akımı
Φ_b	Potansiyel engeli yüksekliği
R_s	Seri direnç
I_{top}	Toplam akım
I_h	Hollerden kaynaklanan akım
I_e	Elektronlardan kaynaklanan akım

J_D	Diyot akım yoğunluğu
J_S	Doyma akım yoğunluğu
V_D	Diyot üzerine düşen potansiyel
V_t	Termal potansiyel
Q	Yük
E	Elektrik alan
ΔV	Potansiyel farkı
e	Elektron yükü
k	Boltzmann sabiti
q	Taşıyıcı yükü
A	Kontak alanı
D_e	Elektron için difüzyon katsayısı
D_h	Hol için difüzyon katsayısı
L_e	Elektron için difüzyon mesafesi
L_h	Hol için difüzyon mesafesi
Ag	Gümüş
Ti	Titanyum
E_{vakum}	Vakum enerji seviyesi
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
A^*	Richardson sabiti
$\Phi_{b,s}$	Yarıiletken tarafındaki potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_{b,m}$	Metal tarafındaki potansiyel engel yüksekliği
m^*	Etkin taşıyıcı kütlesi
h	Planck sabiti
K	Kelvin
I_{net}	Net akım
Pt	Platin
E_s	Valans bandı tavanı ile vakum seviyesinin enerji farkı
$J_{0,D}$	Difüzyondan kaynaklanan doyma akımı
$J_{0,T}$	Termiyonik emisyon kaynaklanan doyma akımı
V_{bi}	Sıfır beslemede kontak potansiyeli
v_R	Termiyonik yeniden birleşme hızı
v_D	Difüzyon kaynaklı yeniden birleşme hızı
N_C	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_V	Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu
μ	Mobilite
NH_3	Amonyak
H_2O_2	Hidrojen peroksit
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidroflorik asit

Kısaltmalar

SDK	Schottky doğrultucu kontak
pnE	p-n eklem
p-Si	P tipi silisyum
PANI	Polianilin

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin vazgeçilmezleri olan yarıiletken aygıtların temeli eklem ya da kontak dediğimiz yapılardır. Kontaklar, elektrik akımını iletebilen iki ayrı maddenin yakın teması ile oluşur. Bu tezin çalışma konusu yarıiletken aygıtlar olduğundan, yarıiletken içeren yarıiletken-yarıiletken, metal-yarıiletken kontaklardan bahsedilecektir.

Kontaklar, omik ve doğrultucu kontaklar olmak üzere iki kısma ayrılırlar. Omik kontaklarda, kontağı oluşturan iki madde kontak bölgesinde birbirinin içine tam olarak nüfuz eder. Dolayısıyla kontak bölgesinde ciddi bir potansiyel engeli oluşmaz. Bu sebeple kontakta geçen akımın miktarı akımın yönüne bağlı olmaz. Yani omik kontakta akım simetrik davranış gösterir. Doğrultucu kontaklarda ise, kontağı oluşturan iki madde kontak bölgesinde birbirinin içine çok az nüfuz eder. Dolayısıyla kontak bölgesinde ciddi bir potansiyel engeli meydana gelir. Oluşan potansiyel engeli sebebiyle kontakta geçen akımın miktarı, akımın yönüne bağlı hale gelir. Yani doğrultucu kontakta akım simetrik değil, asimetrik davranış gösterir.

Yarıiletken teknolojisinde doğrultucu kontaklar kullanılır. Doğrultucu kontaklar kendi aralarında p-n eklemi ve Schottky doğrultucu kontaklar (SDK) olarak iki ana kısma ayrılır. p-n eklemlerde kontağı oluşturan her iki madde yarıiletken (y.i.) olup organik ya da inorganik malzemelerden seçilebilirler. Schottky diyotlarda ise kontağın bir tarafı metal, diğer tarafı ise yarıiletken malzemedir. p-n eklemlerde azınlık taşıyıcılar mevcuttur. Azınlık taşıyıcılar p-tipi yarıiletken için elektron, n-tipi yarıiletken içinse hollerdir. Azınlık taşıyıcıların varlığı kontağın çalışma hızına yani açma kapama zamanına olumsuz etki eder. Schottky kontaklarda azınlık taşıyıcılar mevcut değildir ve bu sebeple geri toparlanma (açılıp kapanma) zamanı çok az olup yüksek frekans gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

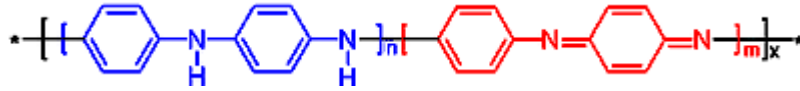
Son yıllarda üzerinde durulan yeni bir alan da organik-Schottky ya da polimer-Schottky kontaklardır. Bu, nispeten yeni bir konu olup potansiyel kullanım alanları sayesinde ciddi dikkat çekmiş ve üzerinde yoğun olarak çalışılmaya başlanmıştır (Tsukamoto ve ark., 1982; Glenis ve ark., 1986; Vehara ve ark., 1988;

Li ve ark., 1990; Pandey ve ark., 1992; Campos ve ark., 1993; Hemangi ve ark., 1996).

Organik ve polimer Schottky diyotlar diğer kontaklara göre çok daha kolay üretilmeleri, kısa zamanda ve bol miktarda üretimlerinin yapılabilmesi, diğer kontaklara göre üretimleri çok daha ekonomik olması, esneklikleri ve çevre dostu olmaları açısından gelecek adına umut vaat etmektedirler (Temirci ve ark., 2010)

Konjuge polimerler olarak da adlandırılan ve iletken polimerler olarak bilinen maddelerden üzerinde en fazla çalışılanlar poliasetilen, polipirol, polianilin ve politiofendir. Bunlar, iletken polimer olarak isimlendirilseler de, aslında yarıiletken özellik gösterirler ve yarıiletken aygıt yapımında kullanılabilirler. İletken polimerler n-tipi ya da p-tipi katkılanabilirler ve katkılama oranları ayarlanarak çok geniş bir spektruma yayılmış iletkenlik değerleri elde edilebilir (Nafdey ve Kelkar, 2005).

İletken polimerler arasında polianilin (PANI) çevre şartlarına karşı direnci ve uygun iletkenliği ile dikkat çekmektedir (MacDiarmid ve ark., 1981; Lacroix ve ark., 1988). İş fonksiyonu 4.10 ve 4.28 eV olarak tespit edilen polianilin (Sharma, Misra, 2002), (Misra ve ark., 2000), ayrıca hafif ve ucuz olup kimyasal gazlara karşı sensör olarak da kullanılabilir (Xie ve ark., 2002), (Barker, 1997). Polianilinin yapısı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Polianilinin ana yapısı ($m + n = 1$ ve x : polimerleşme derecesi)

Bu çalışmada, 3 ayrı PANI çözeltisi (2mg/ml’lik PANI/DMF çözeltisi- Aldrich emeraldin tuzu 530565, hazır Aldrich emeraldin tuzu 650013 ve Aldrich emeraldin tuzu 649996 çözeltileri) p-Si üzerine doğrudan eklenerek doğrultucu kontak yapıldı. PANI üzerine omik kontak için Au buharlaştırıldı. Her üç numuneye ait kontaklar için idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç I-V karakteristikleri ve Cheung fonksiyonları kullanılarak incelendi.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Gümüş sülfür (Ag_2S) bileşiğinin direncinin sıcaklıkla ters orantılı olarak değiştiği 1833 yılında Faraday tarafından bulundu (Pearson ve Brattain, 1955).

Demir oksit ve bakır oksit bileşikleri ile metaller arasında oluşan kontaklarda akımın asimetrik davrandığı tespit edildi (Braun, 1874).

Selenyum kullanılarak ilk kuru doğrultucu yapıldı (Fritts, 1883).

İçinde Bose, Dunwoody ve Pierce'in bulunduğu bir grup tarafından, 1906 yılında bir metal-yarıiletken kontak olan ve yarıiletken madde olarak galena (PbS) kristalinin kullanıldığı ilk nokta detektör, kedi bıyığı (cat's whisker) icat edildi (Pierce, 1907).

Pek çok yarıiletken üzerine püskürtme metodu ile değişik metaller kaplanarak yapılan metal-yarıiletken kontakların doğrultucu karakteristikleri yayınlandı (Pierce, 1907).

Bakır(I) oksit ve bakır(II) oksit bileşikleri kullanılarak ilk düzlem doğrultucu kontak üretildi (Grondahl, 1926).

Yarıiletkenlerin non-lineer özelliklerinden dolayı yıldırımlara karşı paratoner olarak kullanılabilecekleri keşfedildi (McEachron, 1930).

Katıların bant teorisine dayalı olarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisi formüle edildi (Wilson, 1931).

Metal-yarıiletken kontaktaki potansiyel engelin, kimyasal bir tabaka olmayıp, sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığı ileri sürüldü (Schottky, 1938).

Metal-yarıiletken ya da yarıiletken-yarıiletken kontaklarda doğrultucu özelliğin arayüzeydeki potansiyel engelinden kaynaklandığı ileri sürüldü (Mott, 1939).

Potansiyel engelinden taşıyıcıların difüzyonu üzerine kurulmuş doğrultucu teorisi geliştirildi (Schottky ve Spenke, 1939).

Kovalent yarıiletkenlerin yüzeyinde Fermi seviyesi üzerinde yer alan yüzey hallerinin varlığı ve bu nedenle engel yüksekliğinin sabitleştiği fikri ortaya atıldı (Bardeen, 1947).

İkinci dünya savaşı sırasında Amerikan M.I. T. Radyasyon Laboratuvarı'nda ileri derece saflıkta silisyum elde etme, istenilen türde ve istenilen iletkenliği sağlayacak özellikte katkılama metotları geliştirildi ve bu çalışmalar 'Crystal Rectifiers-Kristal Doğrultucular' adlı kitapta yayınlandı (Torrey ve Whitmer 1948).

Bell Telephone Laboratuvarı'nda istenilen yönelime sahip saf kristal ve istenen safsızlıkta kristaller üretildi. Aynı zamanda 'tek kristal' malzemenin bir tarafı n-tipi, diğer tarafı da p-tipi katkılanarak ilk p-n eklemi üretildi (Scaff ve ark., 1949).

Metal-yarıiletken ya da yarıiletken- yarıiletken kontaklarda doğrultucu özelliğin arayüzey tabakası ile ilgili olduğu düşünüldü ve bu yaklaşım kontakların arayüzey ve gövde adı altında incelenmesine vesile oldu. Bu da beraberinde modern transistöre giden yolu açtı (Pearson ve Brattain, 1955).

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların temel teorisi ve tarihi gelişimi, 'Doğrultucu Yarıiletken Kontaklar' (Rectifying Semiconductor Contacts) adlı bir kitapta toplandı (Hensch, 1957).

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda engel yüksekliği, iş fonksiyonu ve arayüzey halleri dikkate alınarak incelendi ve Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorileri birleştirilerek 'termiyonik emisyon-difüzyon teorisi' ortaya kondu (Crowell ve Sze, 1965).

Metal-yarıiletken kontağın potansiyel dağılımı ve yük yoğunluğu arasındaki ilişki Poisson eşitliği ile ifade edildi (Ziel, 1968).

Metal-yarıiletken Schottky kontaklar, yarıiletken-yarıiletken kontaklara göre daha kolay üretilibilmeleri ve ekonomik olmaları sebebiyle yoğun ilgi çekmiş ve güneş pili çalışmalarından detektörlere kadar pek çok sahada kullanılmaya başlanmışlardır (Ashok ve ark., 1979).

Richardson'ın metal-vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termiyonik emisyon teorisinin metal-yarıiletken yapılara da uygulanabileceği gösterildi (Bethe, 1981).

Polimer-metal Schottky diyotların üretiminde ilk olarak poliasetilen kullanıldı (Tsukamoto ve ark., 1982).

Schottky diyotlarının I-V ölçümleri kullanılarak diyotun idealite faktörü ve seri direnci, engel yüksekliğinin hesaplanması için bir metot geliştirildi (Cheung ve Cheung, 1986).

Son yıllarda iletken polimerler denilen poliasetilen, polipirol, polianilin ve politiofen gibi maddeler üzerinde yoğun çalışmalar yapıldı (Tsukamoto ve ark., 1982; Glenis ve ark., 1986; Uehara ve ark., 1988; Li ve ark., 1990; Pandey ve ark., 1992; Campos ve ark., 1993; Hemangi ve ark., 1996;).

Poliasetilen, polipirol, polianilin ve politiofene dair çalışmalarda aygıt performansını belirleyen idealite faktörü, engel yüksekliği ve iş fonksiyonu gibi parametreler I-V ölçümleri ile hesaplandı (Gupta ve ark., 1991; Bantikassegn ve ark., 1996; Yang, 1999; Chen ve ark., 2002).

Çok sayıda metal/yarıiletken polimerin Schottky karakteristikleri üzerinde çalışılmıştır. Bunların performanslarını belirleyen şartlardan bazıları polimerlerin film olarak hazırlanması esnasındaki genel çalışma şartları (sıcaklık, nem, temizlik, süre, v.b.), polimerin dayanıklılığı, kontak yapımında kullanılan metalin iş fonksiyonu olarak sıralanabilir (Huang ve ark., 2003).

3. TEORİK BİLGİ

3.1. Giriş

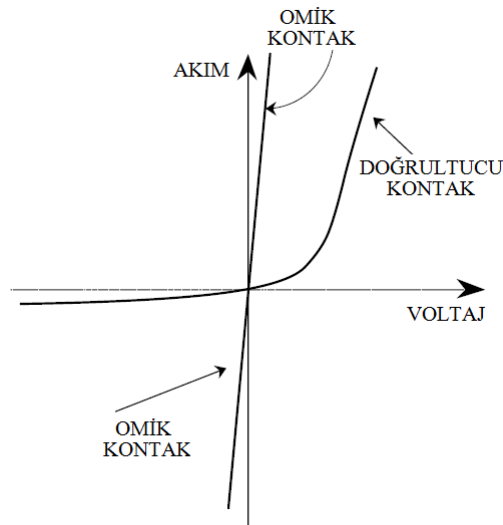
Modern teknolojinin hemen her ürününde kullanım alanı bulan diyotlar aslında metal-yarıiletken ya da yarıiletken-yarıiletken kontaklardır. Yani yarıiletken bir (p veya n tipi) kristal üzerine, neticede doğrultucu özellik gösterebilecek başka bir maddenin kontak edilmesi ile oluşturulurlar. Kontakın ideal olması, yani iyi bir doğrultucu kontak oluşabilmesi kontak malzemelerinin birbirinin içine difüze olmaması kaydıyla en az direnç ile temas etmeleriyle, dolayısıyla kontak yapılan malzemelerin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olması ile doğrudan ilişkilidir (Temirci, 2000).

Kontak yapılan malzemelerin türüne göre, kontaklar iki ana grupta incelenebilir:

1. Metal-yarıiletken Schottky kontaklar.
2. p-n eklemler (yarıiletken-yarıiletken kontaklar)

Kontaklarda metal olarak Au, Cu, Al, Fe v.b. maddeler kullanılırken, yarıiletken olarak Si, Ge, GaAs, InP gibi inorganik element ya da bileşikler; poliasetilen, polianilin, polipirol, politiofen gibi polimerler ile Ligand (N-APTH) tipi organik bileşikler kullanılabilir. (Temirci ve ark., 2010).

Ayrıca oluşan kontakın doğrultucu özellik taşıyıp taşıymasına göre de kontaklar ‘doğrultucu’ ve ‘omik’ kontaklar olarak tasnif edilir. Omik ve doğrultucu kontaklarda akım-voltaj karakteristiği Şekil 3.1’de sembolik olarak gösterilmiştir.



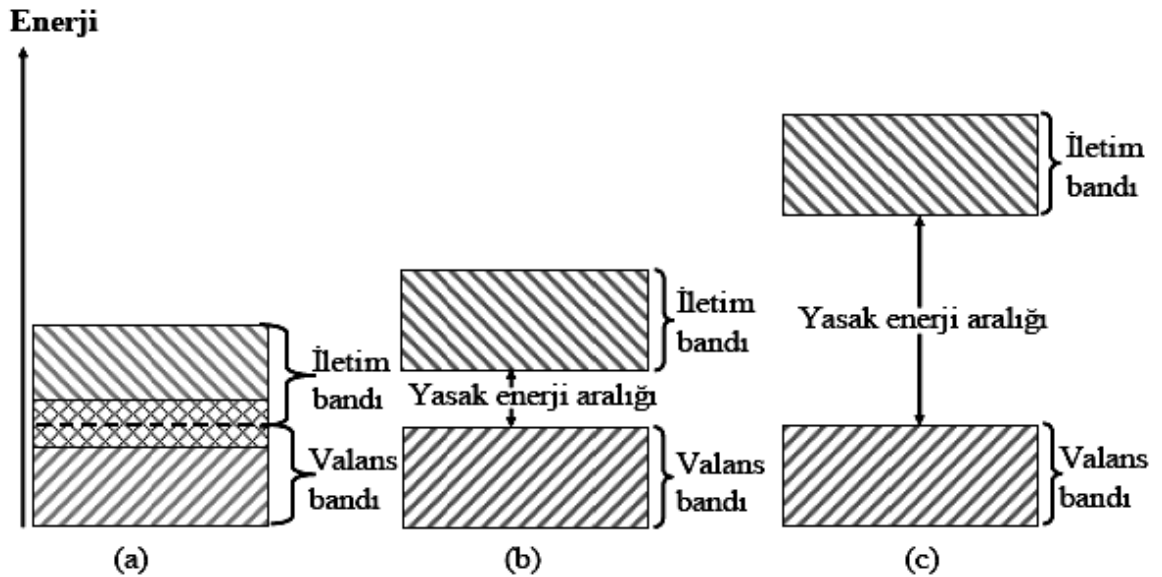
Şekil 3.1. Omik ve doğrultucu kontaklarda I-V ilişkisinin sembolik gösterimi.

Kontaklar, bir metal ile bir yarıiletkenin yakın teması ile oluşurlar. Kontak haline getirilen maddeler arasında, bu maddelerin elektrokimyasal potansiyelleri eşitleninceye kadar yük alışverişi olur (Ziel, 1968).

Katıhal elektroniğinin önemli bir kısmını doğrultucu ve omik kontaklarda akım iletimi ve bu kontakların fiziksel özellikleri teşkil eder (Özdemir, 2000). Bir kontağı anlatırken bilinmesi gereken temel parametre ve bilgiler şunlardır:

1. Vakum seviyesi: Metalin dışındaki hareketsiz bir serbest elektronun enerjisini ifade eder (Özdemir, 2000).
2. Fermi enerji seviyesi (E_F): Dolu ve boş yörüngeleri birbirinden ayıran izafi bir seviyedir. Saf yarıiletkenlerde yasak enerji aralığının ortaları civarındadır. Fermi seviyesi yasak enerji aralığında olup, p-tipi yarıiletken için valans bandının üst sınırına (tavanına) yakın iken, n-tipi yarıiletken malzemeler için iletim bandının alt sınırına (tabanına) yakındır. (Özdemir, 2000).
3. Fermi dağılım fonksiyonu ($f(E)$): Bir elektronun sıcaklığa bağlı olarak belli bir E enerji seviyesinde bulunma (E enerjisine sahip olma) ihtimalini belirtir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Sağlam ve Ateş, 2007).

$$f_{(E)} = \frac{1}{1 + \exp[-(E_F - E)/kT]} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2. a) İletkenlerin, b) Yarıiletkenlerin, c) Yalıtkanların enerji-bant diyagramları (Mutlu, 2010).

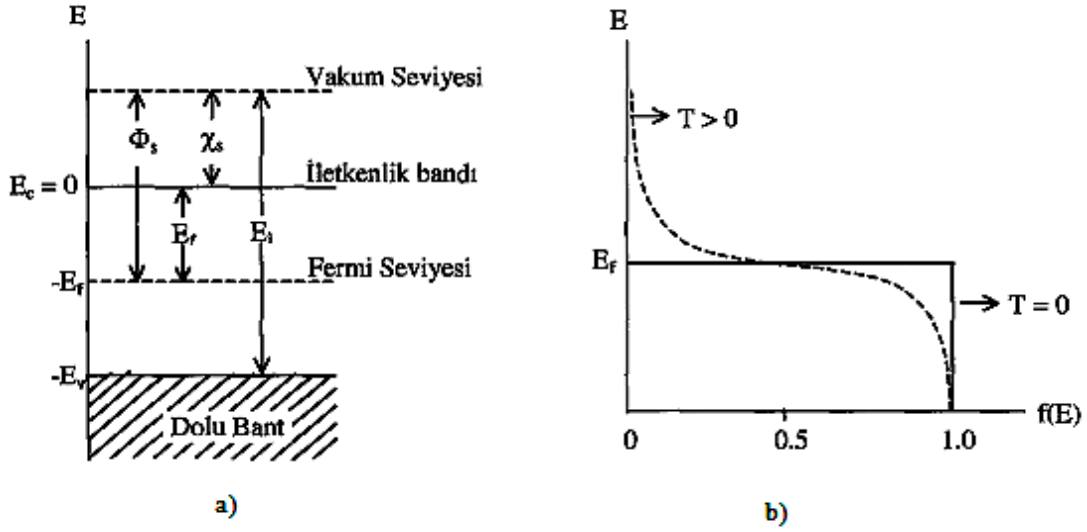
4. Valans (değerlik) bandı: Yarıiletkeni oluşturan atomların değerlik elektronlarının bulunduğu orbitallerin oluşturduğu enerji bandıdır. Valans bandının tavanı E_v ile belirtilir (Ziel,1976).
5. İletkenlik bandı: Yarıiletkeni oluşturan atomlara ait boş orbitallerin oluşturduğu enerji bandıdır. İletkenlik bandının tabanı E_c ile belirtilir. (Ziel,1976).
6. Yasak enerji aralığı (E_g): Bir maddenin valans bandının tavanı (E_v) ile iletkenlik bandının tabanı (E_c) arasındaki farktır (Bkz. Şekil 3.2) ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Sağlam ve Ateş, 2007). Bazı yarıiletkenler için yasak enerji aralıkları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

$$E_g = E_c - E_v \quad (3.2)$$

Çizelge 3.1. Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları (E_g)

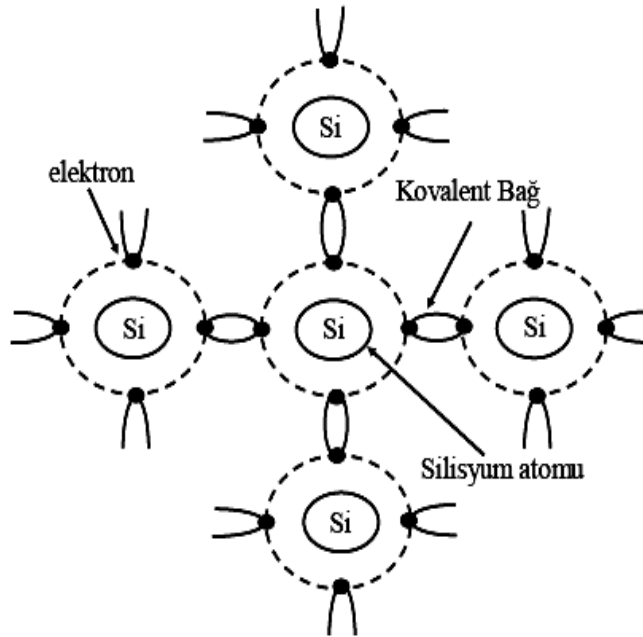
Yarıiletken Kristal	Yasak Enerji Aralığı (Bant Aralığı) (E_g)	
	0 K	300 K
Ge	0,74	0,66
Si	1,17	1,11
GaAs	1,52	1,43
GaP	2,32	2,25
AlSb	1,65	1,60
InP	1,42	1,27
GaSb	0,81	0,68

7. Elektron yatkınlığı (χ_s): İletkenlik bandının tabanı ile (E_c) vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır.
8. E_s : Valans bandının tepesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır.
9. İş fonksiyonu (Φ): Fermi seviyesinde bulunan bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gereken minimum enerjidir. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkeninki ise Φ_s ile gösterilir (Şekil 3.3).

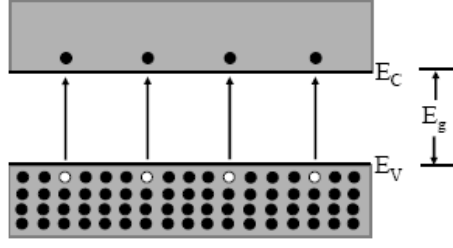


Şekil 3.3. a) Yarıiletken veya yalıtkanın kristal modelinde enerji-bant diyagramı. b) Saf yarıiletken için Fermi dağılım fonksiyonunun enerjiye göre değişimi (T: Kelvin cinsinden) (Özdemir, 2000).

10. Saf (katkısız) yarıiletken: Sadece tek tip atomlardan (veya atom gruplarından) oluşmuş, içerisinde herhangi bir yabancı atom bulundurmeyen, dolayısıyla da elektron ve hol konsantrasyonları eşit olan ($n = p = n_i$) yarıiletkenlerdir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).

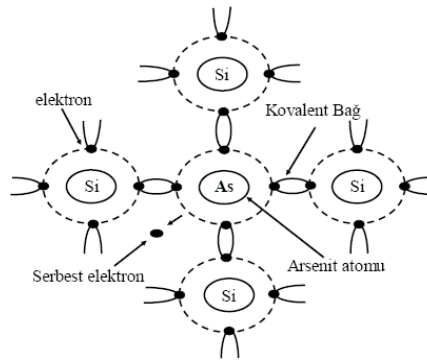


Şekil 3.4. Katkısız (saf) yarıiletkenden silisyum kristali için atomların ve atomlar arası bağların yapısının sembolik gösterimi (Mutlu, 2010).

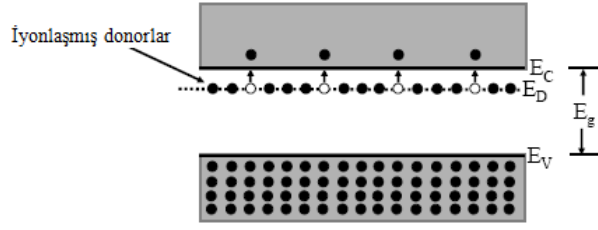


Şekil 3.5. Yarıiletkenlerde elektron-hol çifti oluşumunun sembolik gösterimi (Mutlu, 2010).

11. Katkılı yarıiletken: Tek tip atomlardan (ya da atom gruplarından) oluşmamış, içerisinde yabancı atomlar da bulunduran yarıiletkenlerdir. n ve p tipi diye iki gruba ayrılırlar. Yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmek için, kristali oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı ancak uygun atomların yerleştirilmesi işlemine ‘katkılama’ adı verilir (Abukay ve ark., 1991).
12. Safsızlık: Yarıiletkene dışarıdan eklenmiş katkı atomlarıdır. Donör ve akseptör diye iki gruba ayrılırlar.
13. Donör atomları: Genelde 5A grubu (bazen de 6A) elementleri olup yarıiletken malzemeye katkılanınca elektronlarından 1 tanesi (6A ise 2 tanesi) katkı atomuna zayıf bir bağla bağlı olduğundan sıcaklık etkisi ile kolayca iyonlaşabilirler. Yarıiletken malzeme bünyesinde fazla elektron kaynağıdır. Bu sebeple saf yarıiletkeni n (negatif)-tipi yarıiletkene dönüştürürler (Sağlam ve Ateş, 2007). n-tipi bir yarıiletkenin bağ yapısı Şekil 3.6’da, bant yapısı ise Şekil 3.7’de sembolik olarak gösterilmiştir).

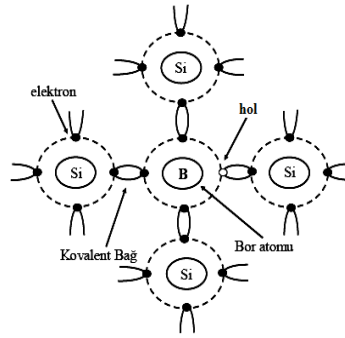


Şekil 3.6. n-tipi katkılı yarıiletkenin bağ yapısının sembolik gösterimi (Mutlu, 2010).

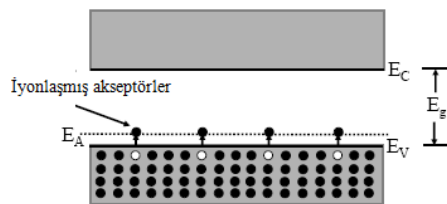


Şekil 3.7. n-tipi yarıiletkenin bant yapısı (Mutlu, 2010).

14. Donor konsantrasyonu (N_D): Donor atomlarla katkılanmış bir yarıiletkende birim hacim başına düşen katkı atomu sayısıdır (Sağlam ve Ateş, 2007).
15. Akseptör atomları: Genelde 3A grubu (bazen de 2A) elementleri olup yarıiletken malzemeye katkılanınca bağlarından 1 tanesi (2A ise 2 tanesi) boş kalır ve sıcaklık etkisi ile kolayca komşu yarıiletken atomlardan elektron alarak iyonlaşabilirler. Yarıiletken malzeme bünyesinde eksik elektron sebebidirler. Bu sebeple saf yarıiletkeni p-tipi (pozitif) yarıiletkene dönüştürürler. (Sağlam ve Ateş, 2007). p-tipi bir yarıiletkenin bağ yapısı Şekil 3.8’de, bant yapısı ise Şekil 3.9’da sembolik olarak gösterilmiştir.
16. Akseptör konsantrasyonu (N_A): Akseptör atomlarla katkılanmış bir yarıiletkende birim hacim başına düşen katkı atomu sayısıdır (Sağlam ve Ateş, 2007).



Şekil 3.8. p-tipi katkılı yarıiletkenin bağ yapısının sembolik gösterimi (Mutlu, 2010).



Şekil 3.9. p-tipi yarıiletkenin bant yapısı (Mutlu, 2010).

17. Arayüzey: Metal ile yarıiletkenin kontak bileşenlerinin temas ettiği yüzeydir.
18. Yüzey yükü: Arayüzeyde metal tarafının dış kısmında bulunan yüklerdir.
19. Hacimsel yük: Yarıiletken gövdesi içerisinde bulunan ve genelde iyonlaşmış katkı atomlarından kaynaklanan yüklerdir.
20. Arınma bölgesi (w): Metal-yarıiletken kontak oluşumu esnasında meydana gelen yük alış verişi sonucu yarıiletken tarafında oluşur ve uzay yükü bölgesi olarak da bilinir. Yarıiletken-yarıiletken kontak (p-n eklemi) oluşumu esnasında ise kontağın her iki tarafında meydana gelir. Yük yoğunluğu ara yüzeyde en fazla olup arayüzeyden yarıiletkenin içine doğru uzaklaştıkça azalır. Çok dar bir bölgedir.
21. Gövde: Yarıiletkenin arayüzey bölgesinden arka tarafındaki omik kontağa kadar olan bölgesi olup nispeten yüksek voltajlarda seri dirence katkıda bulunur.
22. Ters beslem: Kontakın n-tipi yarıiletken tarafını üretecin pozitif kutbuna, diğer tarafını üretecin negatif kutbuna bağlamadır. Ya da kontakın p-tipi yarıiletken tarafını üretecin negatif kutbuna, diğer tarafını üretecin pozitif kutbuna bağlamadır.
23. Doğru beslem: Kontakın n-tipi yarıiletken tarafını üretecin negatif kutbuna, diğer tarafını üretecin pozitif kutbuna bağlamadır. Ya da kontakın p-tipi yarıiletken tarafını üretecin pozitif kutbuna, diğer tarafını üretecin negatif kutbuna bağlamadır.
24. Doyma akımı (I_0): Metal-yarıiletken kontakta voltaj uygulanmadığında da yük difüzyonundan dolayı kontakta akım meydana gelir. Bu akım çift yönlüdür ve toplamda sıfırdır. Kontakta ters beslem uygulandığında bu çift yönlü akımlardan biri engellenir ve sadece diğeri kalır. İşte ters beslem durumunda ölçülen akıma doyma akımı denir.
25. İdealite faktörü (n): Doğrultucu kontakın ne kadar iyi ya da kötü bir kontak olduğunu gösteren bir parametredir. İdeal bir kontak için $n = 1$ 'dir. Ancak, ara yüzey tabakaları, kirlilikler v.b. sebeplerle ideal bir kontak elde etmek mümkün değildir. Metal-inorganik yarıiletken kontaklar için 1'e yakın idealite faktörleri iyi değerler sayılmakla birlikte, metal-organik yarıiletken

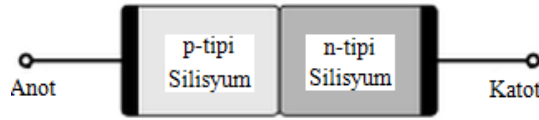
kontaklar için idealite faktörü 3-6 arasında değerler alabilir. p-n eklemlerde ise idealite faktörü değerleri 1.2-2.0 arasındadır.

26. Engel Yüksekliği (Φ_b): Metal-yarıiletken ya da yarıiletken-yarıiletken kontak oluştuktan ve yük alış verişi tamamlandıktan sonra, yarıiletkenin enerji seviyeleri her iki tarafın iş fonksiyonları farkı kadar alçalır. Bu arada yük alış verişinin sebep olduğu arayüzey civarındaki dipol tabakası arayüzey bölgesinde yarıiletken enerji bantlarının bükülmesine sebep olur. Böylelikle bir potansiyel engeli oluşur. Bu potansiyel engelinin yüksekliğine engel yüksekliği denir.
27. Seri direnç (R_s): Kontaklı oluşturan yarıiletken maddenin kontakta uzak kısımlarının yani gövdesinin yüksek voltajlarda gösterdiği dirençtir.

3.2. p-n Eklemler

Elektronik ürünlerin pek çoğu bir veya birkaç akım kontrol birimi içerir. Akım kontrol birimleri de genelde p-n eklemlerinden oluşur. p-n eklemi akımı bir yönde daha kolay ileten bir yapıdır.

p-n eklemi (kontaklı) aynı yarıiletken taban malzeme üzerine farklı türde katkı atomları eklenerek yapılabildiği gibi, farklı maddelerden oluşmuş iki zıt tip yarıiletken maddeyi doğrudan doğruya temas ettirerek de üretilebilir. Şekil 3.10'da p-n eklemin sembolik çizimi verilmiştir.

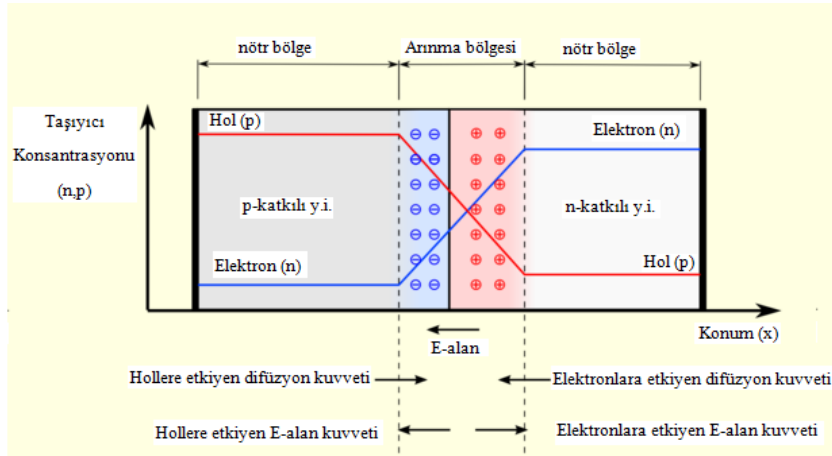


Şekil 3.10. Silisyum altlık üzerine yapılmış bir p-n ekleminin sembolik çizimi.

p-n ekleminin p-tipi yarıiletken tarafında çoğunluk taşıyıcılar holler, azınlık taşıyıcılar ise elektronlardır. n-tipi yarıiletken tarafında ise çoğunluk taşıyıcılar elektronlar, azınlık taşıyıcılar ise hollerdir. p-n ekleminde toplam akım holler ve elektronlardan kaynaklanan akımların toplamına eşittir.

$$I_{top} = I_h + I_e \quad (3.3)$$

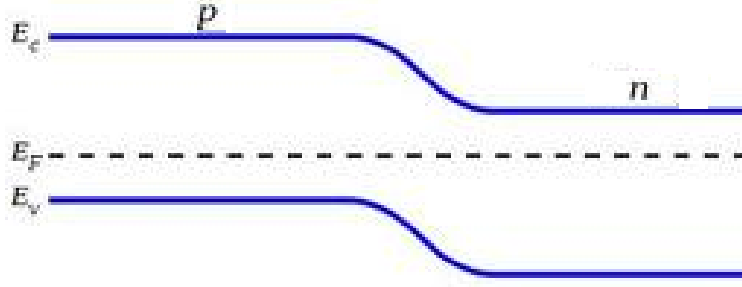
Bir yapının p-n eklemi olabilmesi için farklı tip iki yarıiletkenin kontağı ile oluşması şarttır. Kontak haline getirilen yarıiletkenler arasında, bu yarıiletkenlerin elektrokimyasal potansiyelleri, yani Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar yük alışverişi devam eder. Aslında bu yük alışverişi n-tipi yarıiletken tarafında fazlasıyla bulunan elektronların p-tipi yarıiletken tarafına, p-tipi yarıiletken tarafında fazlasıyla bulunan hollerin ise n-tipi yarıiletken tarafına difüzyonu ile başlar. Difüzyon devam ettikçe eklem yerinin iki tarafında uzay yükleri (iyonlaşan donör ve akseptörlerden dolayı) oluşur ki bu sebeple kontak bölgesinde n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene doğru bir elektrik alan meydana gelir. Bu elektrik alan holleri p-tipi yarıiletken tarafına, elektronları da n-tipi yarıiletken tarafına doğru iter (Şekil 3.11). Böylece birbirine zıt iki süreç aynı anda eklem bölgesinde etkili olmaya başlar. Elektrik alandan kaynaklanan kuvvet ile difüzyondan doğan kuvvet birbirine eşit olduğunda termal dengeye de ulaşılmış olur.



Şekil 3.11. Bir p-n eklemine ait bölge ve bu bölge içindeki taşıyıcı konsantrasyonlarının sembolik çizimi.

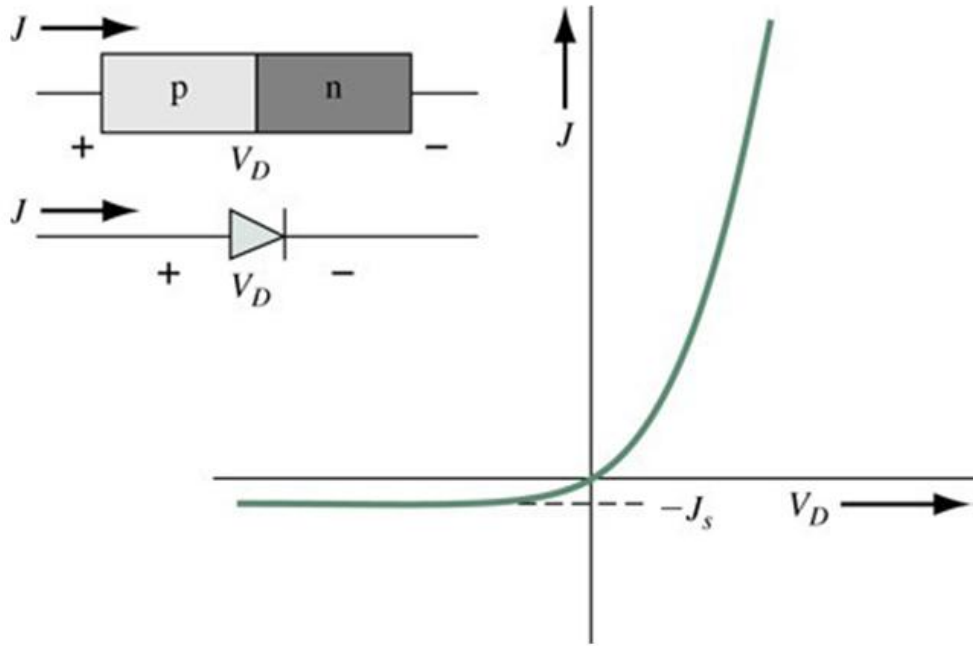
Bu yük alış veriş neticesinde her iki yarıiletkenin enerji bantları bükülür ve termal dengeye ulaşıldığında her iki yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri (E_F) düzeyleri eşitlenmiş olur (Şekil 3.12 ve Şekil 3.18). Uzay yükü bölgesinde (yani arınma bölgesinde) enerji bantlarının bükülmesi ile bir potansiyel engeli oluşur.

p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler kontak yapıldığında kontak civarında bir yük alış veriş olduğundan, kontak bölgesinin p-tarafında hol azlığı, n-tarafında ise elektron azlığı meydana gelir ki bu da bir arınma bölgesi oluşmasına sebep olur.



Şekil 3.12. p-n ekleme enerji bant yapısı ve Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi.

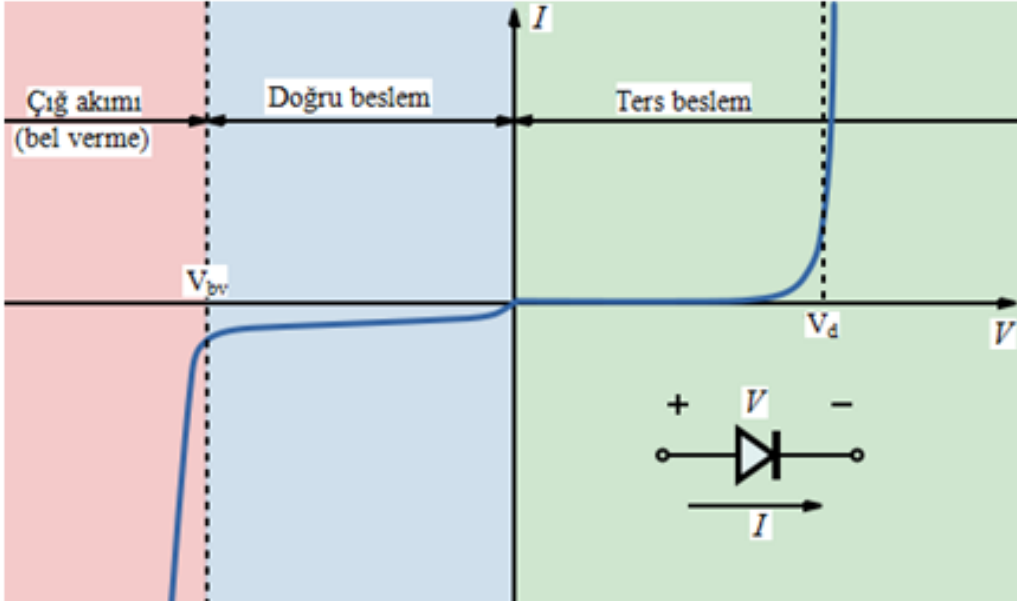
Tabii olarak arınma bölgesi de bir potansiyel engeli oluşturur. Bu durumda, kontağa uygulanan potansiyelin polarizasyonuna göre kontak akımı geçirir ya da geçirmez. Yani potansiyel engelinden dolayı akıma karşı asimetrik davranır. Bu asimetrik karakter Şekil 3.13'te akım yoğunluğu-voltaj grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 3.13. İdeal bir p-n ekleme (diyota) ait akım yoğunluğu-voltaj karakteristiği.

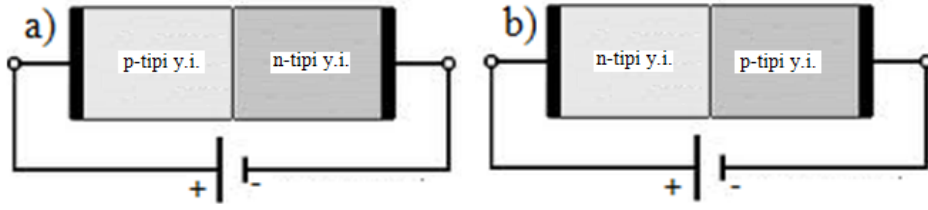
Aslında bir p-n eklemi için çizilen bir I-V grafiğinde 3 bölgeden söz edilebilir (Şekil 3.14):

1. Doğru beslem bölgesi ($V > 0$)
2. Ters beslem bölgesi ($V < 0$, düşük voltajlar) (sızıntı akımı mevcut)
3. Ters beslem bölgesi ($V < 0$, yüksek voltajlar) (çığ akımı mevcut)



Şekil 3.14. Bir p-n eklemeye ait I-V grafiğinin bölgelerinin sembolik çizimi.

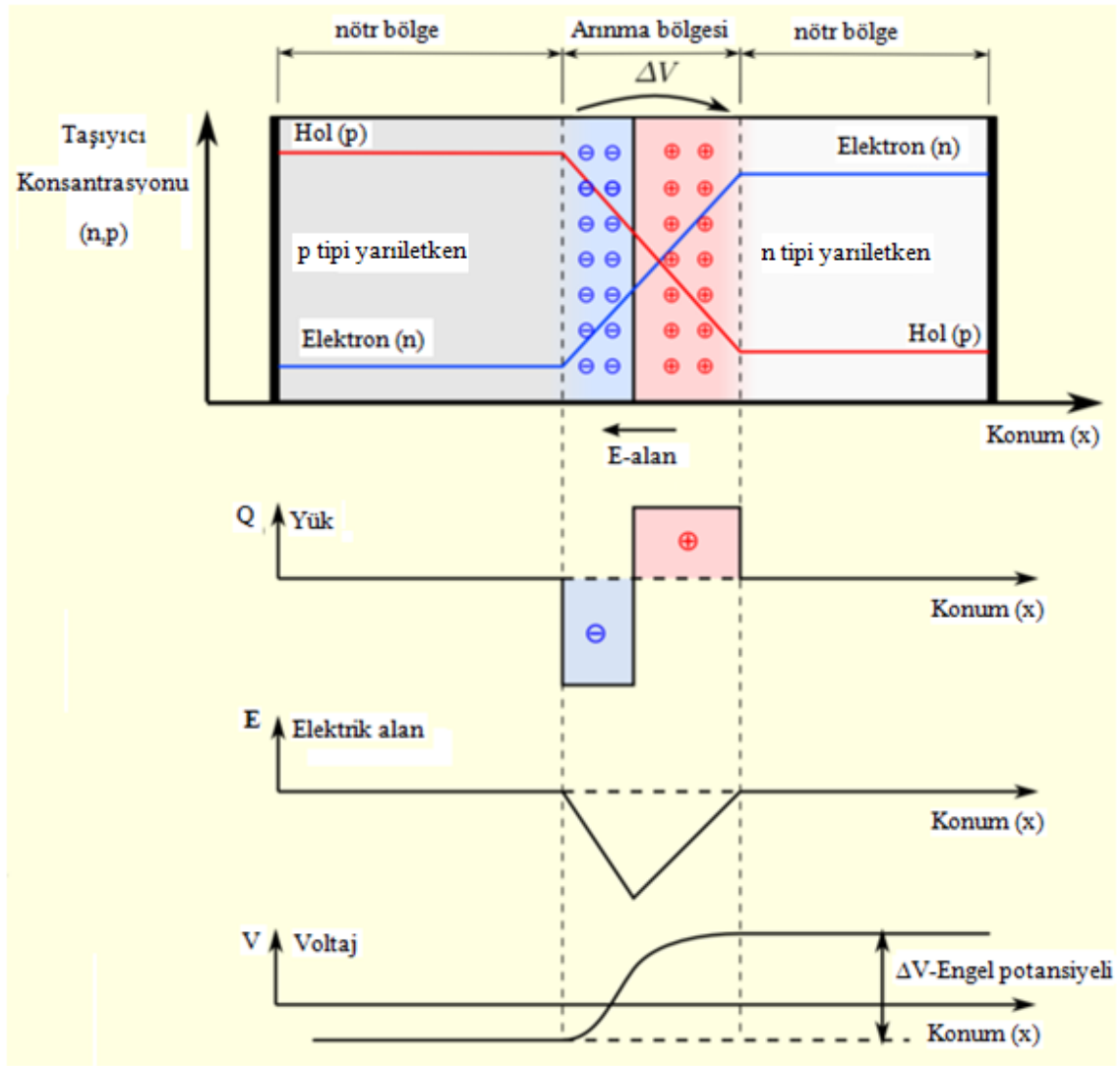
p-n eklemesinin p tarafı üreticinin pozitif, n tarafı ise negatif terminaline bağlanırsa doğru beslem; n tarafı üreticinin pozitif, p tarafı ise negatif terminaline bağlanırsa ters beslem oluşur (Şekil 3.15).



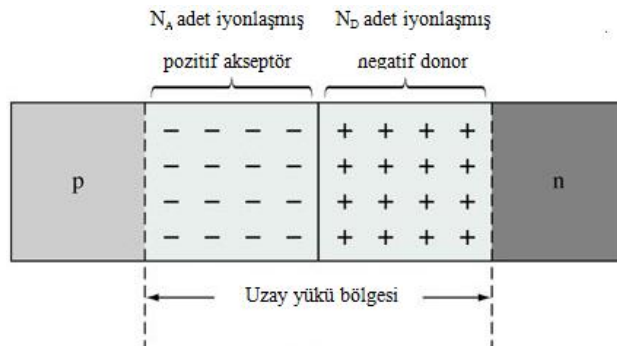
Şekil 3.15. p-n eklemde: a) Doğru beslem, b) Ters beslem.

Şekil 3.16'dan da görüleceği üzere, hem p-tipi hem de n-tipi için kontak noktasından başlayıp yarıiletkenlerin içine doğru:

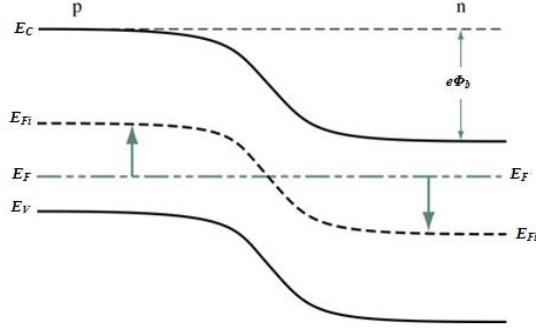
1. Düzgün bir uzay yükü dağılımı olduğu ve bu uzay yüklerinin kontakta belli bir mesafede (iki tarafın eşit uzunlukta olması şart değildir) aniden bittiği kabul edilir (Şekil 3.17).
2. Bu düzgün yük dağılımı sebebiyle düzgün (lineer) azalan bir elektrik alan oluştuğu öngörülür.
3. Düzgün azalan elektrik alandan dolayı kuadratik olarak artan bir potansiyel oluştuğu öngörülür.



Şekil 3.16. Bir p-n eklemine ait arınma bölgesinde, dış elektrik alan olmadığı durumda, yük, elektrik alan ve voltaj değişiminin sembolik gösterimi.

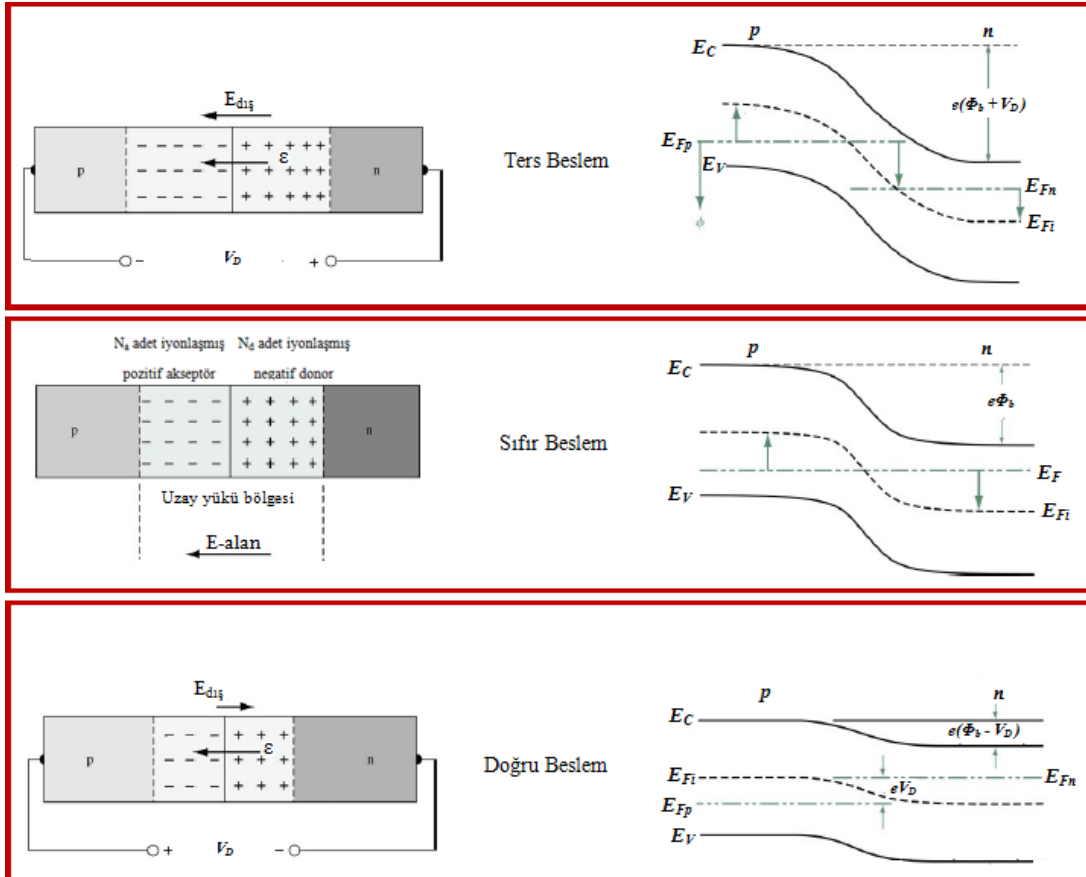


Şekil 3.17. Bir p-n eklemine ait uzay yükü bölgesinin sembolik gösterimi.



Şekil 3.18. Termal dengeye ulaşmış bir p-n eklemde, dış elektrik alan yokluğunda enerji-bant yapısının eklem bölgesinde bükülmesi, Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi, engel potansiyelinin oluşumu.

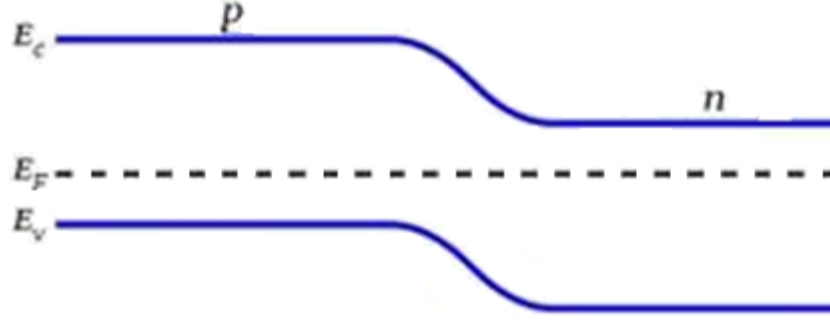
Şekil 3.19’da ters beslem, sıfır beslem ve doğru beslem durumları için uzay yükü bölgesi ve enerji-bant yapısı sembolik olarak gösterilmiştir.



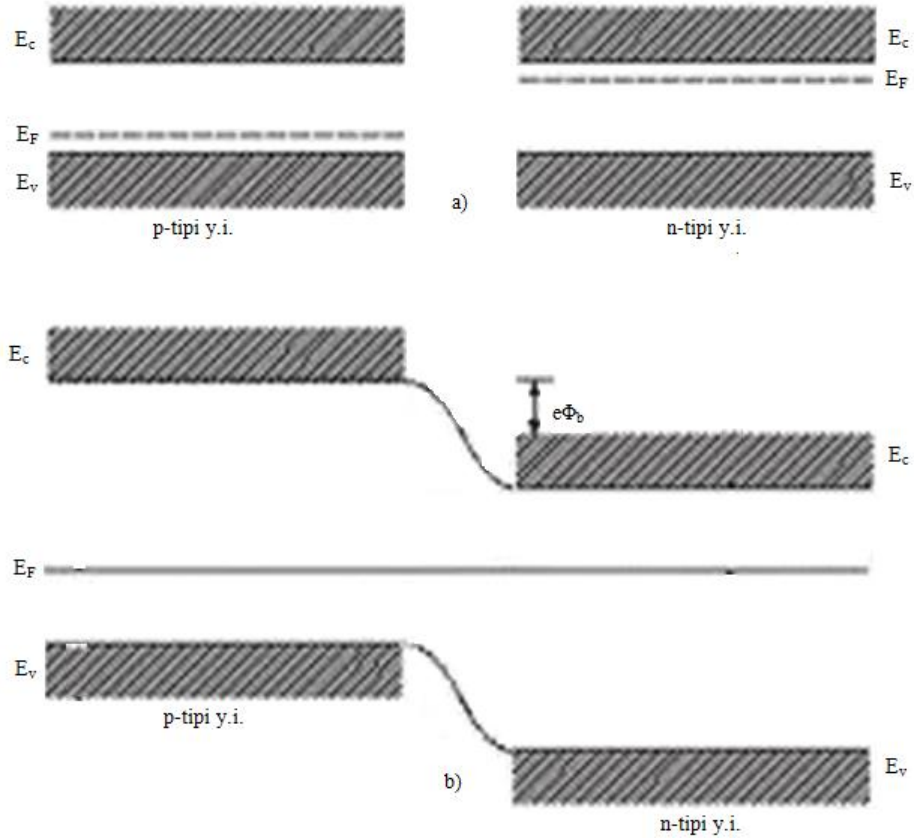
Şekil 3.19. Ters beslem, sıfır beslem (dış elektrik alan yok) ve doğru beslemde p-n eklemının uzay yükü (arınma) bölgesinin ve enerji-bant seviyelerinin durumunun sembolik gösterimi (Neamen, 2009).

3.2.1. Homo Eklemler

Aynı yarıiletken taban malzemenin bir tarafı n-tipi diğer tarafı da p-tipi olarak katkılanarak oluşturulurlar. p-Si/n-Si gibi. Bu tür p-n eklemlerde enerji bantları süreklidir. Altlığı oluşturan tüm kristal atomları aynı olduğundan boşta kalan bağ oluşmaz. Bant kırılması yoktur (Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Tuzak seviyesi oluşmaz.



Şekil 3.20. p-n homo eklemden enerji bant yapısı.

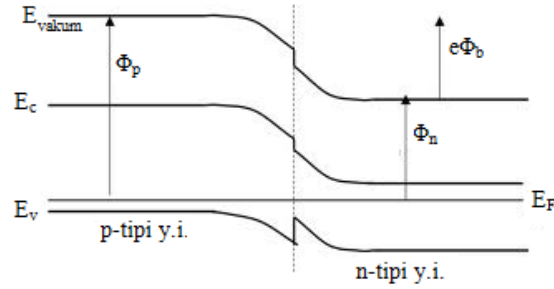


Şekil 3.21. Bir p-n homo eklemden enerji bant yapısının sembolik gösterimi:

a) Eklemden oluşmadan önce, b) Eklemden oluşuktan sonra.

3.2.2. Hetero Eklemler

Farklı yarıiletken malzemeler üzerine ayrı ayrı n-tipi ve p-tipi katkı yapıp bunları birbirine eklemek suretiyle oluşturulurlar. p-Si/n-GaAs gibi. Bu tür p-n eklemlerde enerji bantları sürekli değildir. Taban malzemesini oluşturan tüm kristal atomları aynı olmadığından boşta kalan bağlar olur. Bu sebeple bant kırılmaları oluşur (Şekil 3.22) ve tuzak seviyeleri meydana gelir.



Şekil 3.22. p-n hetero eklemden enerji bant yapısı.

3.2.3. İdeal Diyot Denklemi

Bir p-n eklem için ideal diyot denklemi şu şekilde yazılır:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

Bu denklemdeki I_0 - doyma akımının açık formu ise aşağıdaki gibidir:

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_e}{L_e N_A} + \frac{D_h}{L_h N_D} \right) \quad (3.5)$$

Burada:

D_e : Elektron için difüzyon katsayısı ,

D_h : Hol için difüzyon katsayısı,

L_e : Elektron için difüzyon mesafesi,

L_h : Hol için difüzyon mesafesi,

N_A : p-tipi yarıiletken için birim hacme düşen akseptör sayısı, N_D : n-tipi yarıiletken için birim hacme düşen donör sayısı, q : Elektron yükü, A : Konağın kesit alanı,

n_i : asal (katkısız) yarıiletkenlerde birim hacme düşen taşıyıcı yoğunluğu olarak verilir.

3.3. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlar

Bir kontağın doğrultucu ya da omik kontak olması, kullanılan yarı iletkenin tipine ve metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonunun (Φ_s) farkına bağlıdır. Doğrultucu ya da omik kontak oluşumu kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda:

1. $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak oluşur.
2. $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur.

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda:

1. $\Phi_m > \Phi_s$ ise omik kontak oluşur.
2. $\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu kontak oluşur.

3.3.1. Metal/n-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Diyotlar

Al/n-Si, Ag/GaAs, Ti/n-Si, W/n-Si, Au/n-Si, gibi yapılardır. $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda oluşurlar.

n-tipi yarıiletkenlerde akım taşıyıcılar elektronlar olup negatif yüklüdürler.

Bu yapılarda akım taşıyıcılar (elektronlar) bir yönde rahat ilerlerken diğer yönde engel yüksekliği fazla olduğu için ilerleyemezler. Bu da kontağın akıma karşı asimetric davranması olup, kontağın doğrultucu olduğunu gösterir.

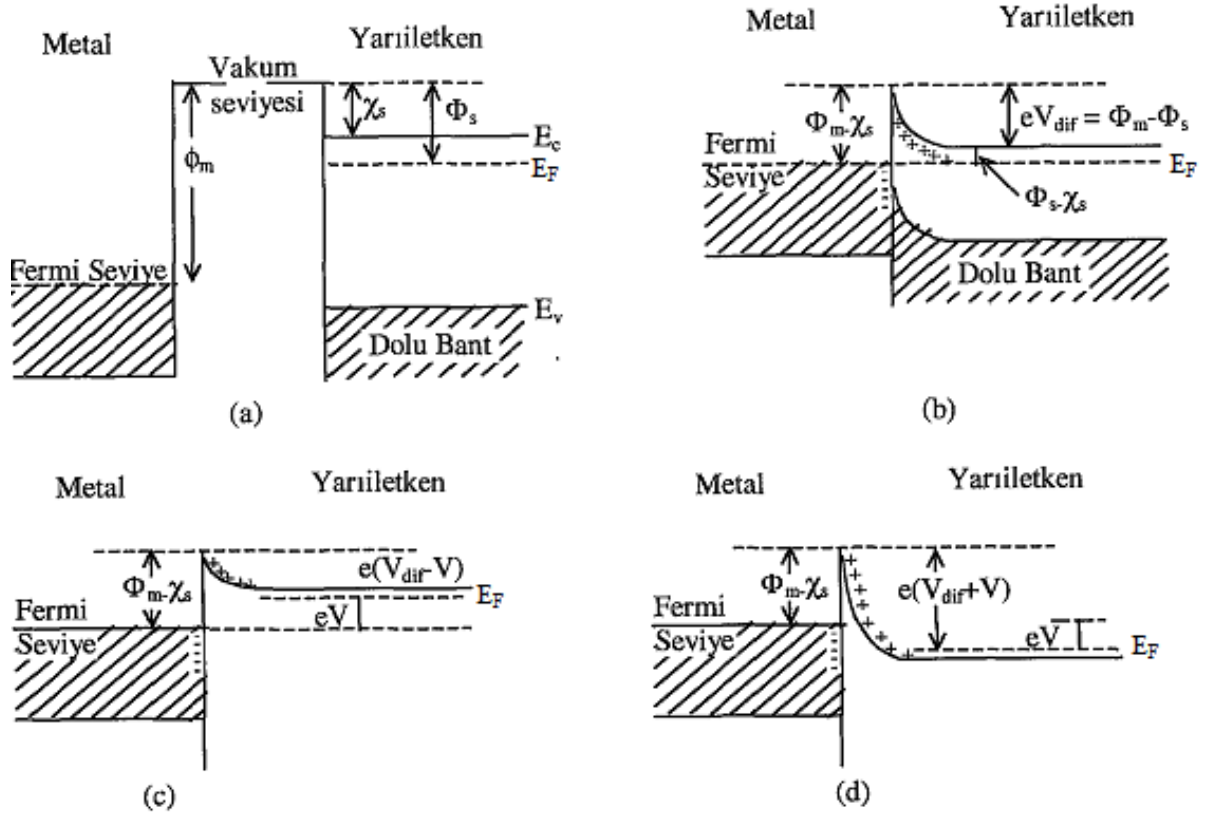
Doğrultucu kontak oluşabilmesinde önemli bir faktör de maddelerin birbirine tamamiyle karışmamasıdır. Difüzyonun az, temasın da neredeyse sadece ara yüzeyle sınırlı olması gerekir.

Kontak oluştuktan sonra elektrokimyasal denge oluşuncaya kadar yarıiletken metale doğru elektron akımı olur. Her iki tarafın Fermi enerji seviyeleri eşitlendiğinde (elektrokimyasal dengeye ulaşıldığında) yük akışı durur. Yarıiletken tarafında arayüzey yakınında elektron kaybından kaynaklanan arınma bölgesi oluşur ki bu da enerji bantlarının yukarı kıvrılmasına sebep olur. Böylece bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu arada arayüzey civarında bir dipol bölgesi oluşur. Arınma bölgesi sığa etkisi gösterir.

n-tipi yarıiletkende arınma bölgesi ve potansiyel engeli oluşumu şu şekilde de ele alınabilir:

n-tipi yarıiletken için akım taşıyıcılar elektronlar olduğundan ve kontak oluşumu esnasında $\Phi_m > \Phi_s$ 'den dolayı n-tipi yarıiletken elektron kaybettiğinden, yarıiletkenin kontağa yakın bölgesinde yük taşıyıcı (elektron) azlığı sebebiyle arınma bölgesi oluşur, direnç artar ve potansiyel meydana gelir.

Metal/n-tipi kontak için doğru beslem demek, metalin üretceci pozitif ucuna, n-tipi yarıiletkenin ise üretceci negatif ucuna bağlanması demektir.



Şekil 3.23. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için, d) Ters beslem için (Özdemir, 2000).

Şekil 3.23.'de de görüldüğü gibi, metalden n-tipi yarıiletkenine geçişte elektronlar için engel yüksekliği;

$$\Phi_{b,m} = \Phi_m - \chi_s \quad (3.6)$$

ile verilirken, n-tipi yarıiletkenden metale geçişte elektronlar için engel yüksekliği:

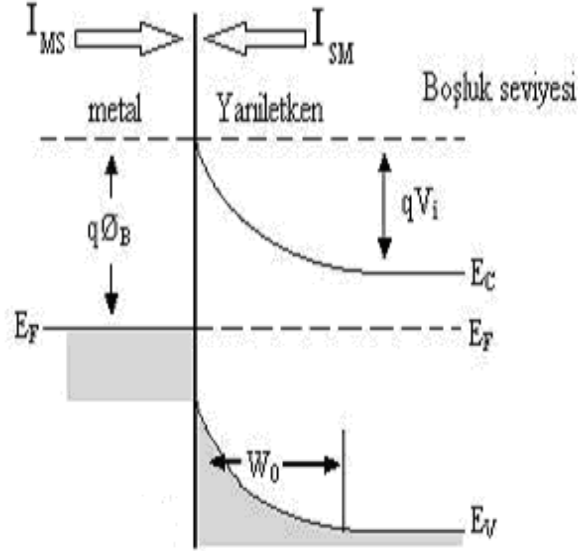
$$\Phi_{b,s} = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.7)$$

ile ifade edilir. Burada

$$\Phi_{b,s} = e \cdot V_{dif} \quad (3.8)$$

olup, V_{diff} yük difüzyonundan kaynaklanan potansiyel fark demektir ve yarıiletkenin yüzeyinden itibaren yarıiletkenin içine doğru alınır.

Termal denge durumunda metalden yarıiletkenine doğru ve yarıiletkenden metale doğru olan akımlar birbirine eşit fakat zıt yönlüdürler (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Metal/n-tipi kontakta voltaj uygulanmadan, termal denge durumunda oluşan birbirine eşit ve zıt yönlü akımlar (Doyma akımları).

Bu akım doyma akımı (I_0) olarak isimlendirilip aşağıdaki şekilde ifade edilir:

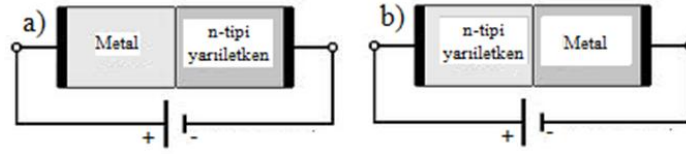
$$I_0 = AA^*T^2 \left[\exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \quad (3.9)$$

A^* : Richardson sabiti olup

$$A^* = \left(\frac{m^* e k^2}{2\pi^2 h^3} \right) \quad (3.10)$$

şeklinde verilir ve bu çalışma esnasında baz alınan formüldür. m^* elektronun (n-tipi yarıiletken için) ya da holün (p-tipi yarıiletken için) etkin kütlesidir.

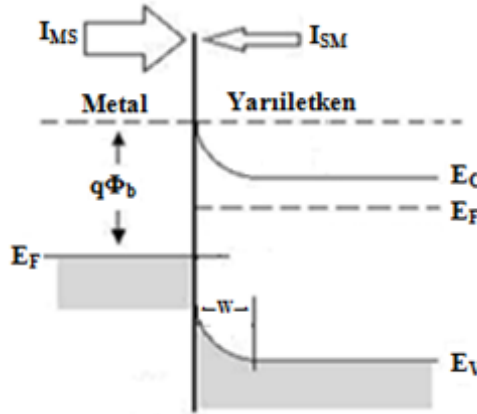
Burada A-diyot alanı ($A = \pi r^2$) (cm^2), A^* -Richardson sabiti ($\text{A/cm}^2\text{K}^2$), T-sıcaklık (K) olarak verilir.



Şekil 3.25. Metal/n-tipi doğrultucu Schottky diyotta: a) Doğru beslem b) Ters beslem.

Doğru beslem durumunda (Şekil 3.25.a ve Şekil 3.23.c) yarıiletken tarafındaki atomların iletkenlik bandı 'eV' kadar yükselir. Dolayısıyla yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli uygulanan 'V' voltajı kadar azalır. Neticede yarıiletkenden metale akan elektron sayısı $\exp(V/V_t)$ çarpanı kadar artar. Burada V_t , termal potansiyel olup $V_t = kT/e$ şeklinde ifade edilir. Yani metalden yarıiletkene (elektronun hareket yönünün tersine) doğru olan akım $I = I_0$ 'dan $I' = I_0 \exp(eV/kT)$ 'ye çıkmış olur. Arınma bölgesi daralır.

Bu esnada, zıt yönde yarıiletkenden metale doğru olan akımda (metalden yarıiletkene akan elektron sayısında) bir değişiklik olmaz. Yani $I = I_0$ olarak kalır.



Şekil 3.26. Metal/n-tipi kontağa doğru beslem uygulandığında oluşan akımlar.

Bu durumda kontakta oluşan (Şekil 3.26) net akım şu şekilde yazılabilir (Özdemir, 2000):

$$I_{\text{net}} = I' - I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] - I_0 \quad (3.11)$$

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklem ideal bir diyot için geçerlidir. Yani $n=1$ durumunda doğrudur. Eğer idealite faktörü $n > 1$ ise bunu denklem içerisinde ifade etmek gerekir ki bu da aşağıdaki gibi verilebilir:

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.13)$$

$$I_{\text{net}} = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.14)$$

Burada $eV \gg kT$ durumunda (özellikle $eV > 3kT$ için), $\exp(eV/kT) \gg 1$ olacağından '1' ihmal edilip,

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir.

Ters beslem durumunda (Şekil 3.25.b ve Şekil 3.23.d) ise, yarıiletken tarafındaki atomların iletkenlik bandı eV kadar alçalır. Dolayısıyla yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli uygulanan voltaj ($-V$) kadar artar. Neticede yarıiletkenden metale akan elektron sayısı $\exp(-V/V_t)$ kadar azalır. Yani metalden yarıiletkene (elektronun hareket yönünün tersine) doğru olan akım $I=I_0$ 'dan $I'=I_0\exp(-eV/kT)$ 'ye inmiş olur. Arınma bölgesi genişler.

Bu esnada, zıt yönde yarıiletkenden metale doğru olan akımda (metalden yarıiletkene akan elektron sayısında) bir değişiklik olmaz. Yani $I = I_0$ olarak kalır.

Bu durumda kontakta (Şekil 3.27) oluşan net akım şu şekilde yazılabilir:

$$I_{\text{net}} = I' - I = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) \right] - I_0 \quad (3.16)$$

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

Burada $eV \gg kT$ durumunda (özellikle $eV > 3kT$ için), $\exp(-eV/kT) \ll 1$ olacağından $\exp(-eV/kT)$ ihmal edilip

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] = I_0 [0 - 1] = -I_0 \quad (3.18)$$

$$I_{\text{net}} = -I_0 \quad (3.19)$$

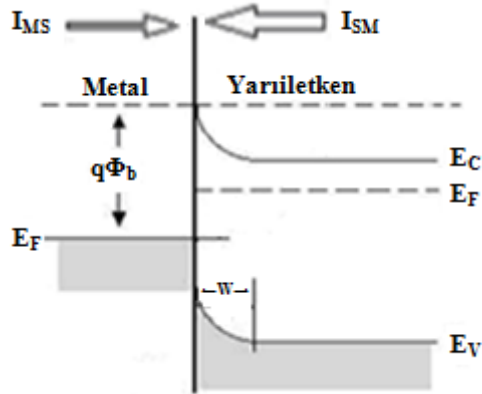
şeklinde yazılabilir. Kısacası, $eV > 3kT$ için doğru beslem durumunda net akım;

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right]$$

olurken, ters beslem durumunda net akım;

$$I_{\text{net}} = -I_0$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 3.27. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta ters beslem uygulandığında oluşan akımlar.

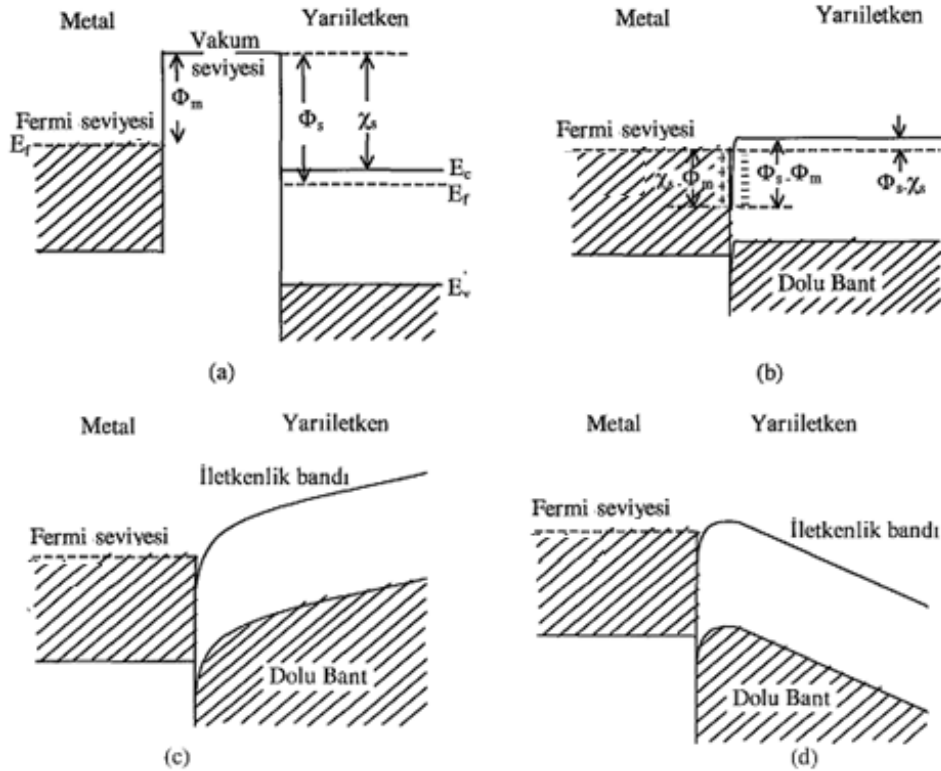
3.3.2. Metal/n-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Al/n-Si, Ag/GaAs gibi yapılardır. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda oluşurlar.

Bu yapılarda metalden yarıiletkene geçişte ve yarıiletkenenden metale geçişte akım taşıyıcıların karşılaşacağı engel yükseklikleri arasında ciddi bir fark yoktur. Dolayısıyla akım yönden bağımsızdır. Bu da kontağın akıma karşı simetrik davranması olup, kontağın omik olduğunu gösterir.

Bir kontağın omik olabilmesi için, kontakta maddelerin birbirine tamamiyle karışması gereklidir. Difüzyonun az, temasın da neredeyse sadece ara yüzeyle sınırlı olması iyi bir omik kontak oluşmasını engeller. İyi bir difüzyon demek, iyi bir omik kontak demektir.

Omik kontakta $\Phi_m < \Phi_s$ olduğundan kontak oluşumundan sonra metalden yarıiletken tarafına elektron geçişi olur ve metalde oluşan hollerin yerini metalin diğer serbest elektronları doldurur.



Şekil 3.28. Metal/n-tipi yarıiletken omik Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için, d) Ters beslem için (Özdemir, 2000).

Şekil 3.28’de de görüldüğü gibi, metalden n-tipi yarıiletkenine geçişte engel yüksekliği;

$$\Phi_{b,m} = \Phi_s - \chi_s \quad (3.20)$$

ile verilirken, n-tipi yarıiletkenden metale geçişte engel yüksekliği:

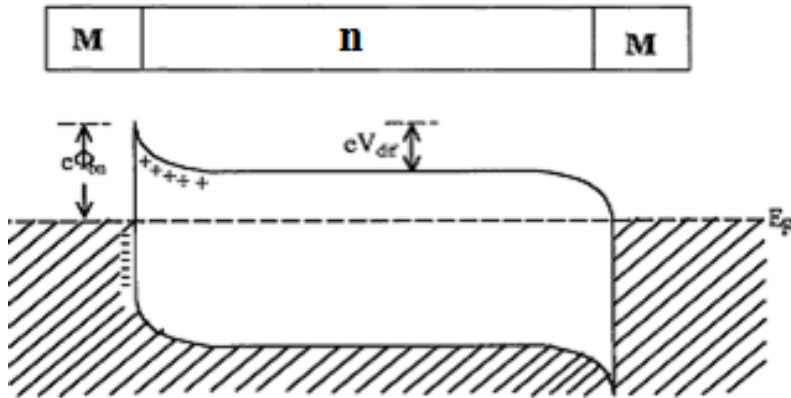
$$\Phi_{b,s} = (\Phi_s - \Phi_m) - (\Phi_s - \chi_s) \quad (3.21)$$

$$\Phi_{b,s} = \chi_s - \Phi_m \quad (3.22)$$

ile ifade edilir. $\Phi_{b,m}$ ve $\Phi_{b,s}$ arasında ciddi bir fark olmadığı için doğrultucu özellik oluşmaz. Kontakın türü omik olur.

3.3.3. Metal (Doğrultucu)/n-tipi Yarıiletken/ Metal (Omik) Yapı

Bu yapı bir n-tipi yarıiletkenin iki tarafına farklı özelliklere sahip metal kontaktlar yapılması ile elde edilir (Şekil 3.29) . Omik kontak yapılacak tarafa elektronca zengin ve $\Phi_m < \Phi_s$ olan bir metal, yarıiletken içerisine iyice difüze olacak şekilde kontak yapılırken, metalin diğer tarafına $\Phi_m > \Phi_s$ olan bir metal, yarıiletken içerisine çok az difüze olacak şekilde kontak yapılır. Bu yapı diyot diye isimlendirilir.



Şekil 3.29. Bir diyotun oluşumunda yarıiletkenin iki tarafının bant yapısının sembolik olarak gösterimi (Özdemir, 2000).

3.3.4. Metal/p-tipi Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Diyotlar

Sn/p-Si, Au/p-Si, Al/p-Si, Ti/p-Si, PtSi/p-Si, gibi yapılardır. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda oluşurlar.

p-tipi yarıiletkenlerde akım taşıyıcılar holler olup pozitif yüklüdürler. Metal/p-tipi doğrultucu kontakta akım taşıyıcılar (holler) bir yönde rahat ilerlerken diğer yönde engel yüksekliği fazla olduğu için ilerleyemezler. Sonuçta kontakta akıma karşı asimetrik karakter oluşur ki bu da kontakın doğrultucu olduğunun göstergesidir.

Kontak oluştuktan sonra metalden yarıiletken tarafına elektronlar akmaya başlar ve bu durum her iki tarafın Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye (elektrokimyasal dengeye ulaşıncaya) kadar devam eder. p-tipi yarıiletkenin arayüzeye yakın bölümünde elektron sayısının artışı (yani hol sayısının azalmasından) kaynaklanan arınma bölgesi oluşur ki bu da enerji bantlarının aşağı kıvrılmasına sebep olur. Böylece bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu arada arayüzey civarında bir dipol bölgesi oluşur ve bu da arınma bölgesinde sığa etkisi görülmesi sonucunu doğurur.

p-tipi yarıiletkende arınma bölgesi ve potansiyel engeli oluşumu şu şekilde de ele alınabilir:

p-tipi yarıiletken için akım taşıyıcılar hol olduğundan ve kontak oluşumu esnasında $\Phi_m < \Phi_s$ 'den dolayı p-tipi yarıiletken elektron kazanıp hol kaybettiğinden, yarıiletkenin kontakta yakın bölgesinde yük taşıyıcı (hol) azlığı sebebiyle arınma bölgesi oluşur, direnç artar ve potansiyel engeli meydana gelir.

Metal/p-tipi kontak için doğru beslem demek, metalin üretcin negatif ucuna, p-tipi yarıiletkenin ise üretcin pozitif ucuna bağlanması demektir.

Şekil 3.30'da görüldüğü gibi, metalden p-tipi yarıiletkene geçişte holler için engel yüksekliği,

$$\Phi_{b,m} = E_s - \Phi_m \quad (3.23)$$

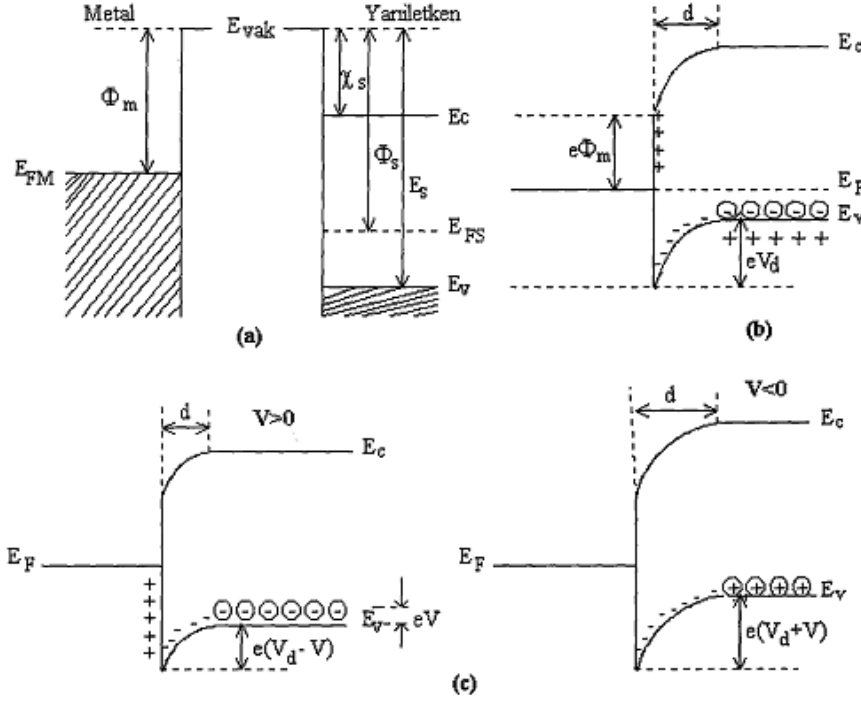
ile verilirken, p-tipi yarıiletkenden metale geçişte holler için engel yüksekliği,

$$\Phi_{b,s} = \Phi_s - \Phi_m \quad (3.24)$$

ile ifade edilir. Burada

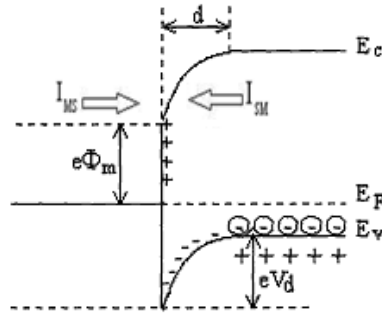
$$\Phi_{b,s} = e \cdot V_{dif} \quad (3.25)$$

olup, V_{diff} yük difüzyonundan kaynaklanan potansiyel fark demektir ve yarıiletkenin yüzeyinden itibaren yarıiletkenin içine doğru alınır.

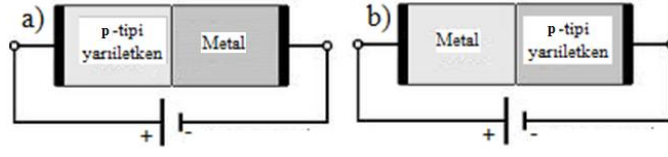


Şekil 3.30. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için ve ters beslem için (Temirci, 2000).

Şekil 3.31’de de görüldüğü gibi termal denge durumunda metalden yarıiletkene doğru ve yarıiletkenen metale doğru olan akımlar birbirine eşit fakat zıt yönlüdürler.



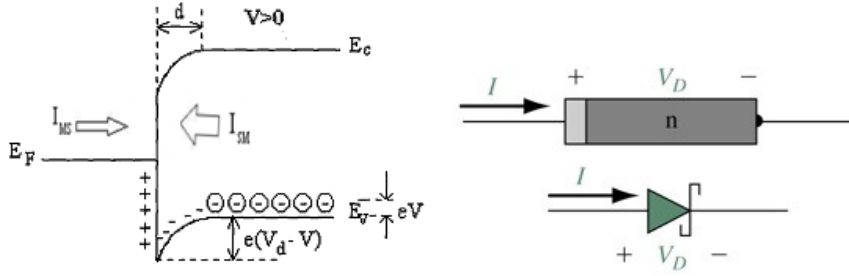
Şekil 3.31. Metal/p-tipi kontakta voltaj uygulanmadan, termal denge durumunda oluşan birbirine eşit ve zıt yönlü akımlar (Doyma akımları).



Şekil 3.32. Metal/p-tipi doğrultucu Schottky diyotta: a) doğru beslem, b) ters beslem.

Doğru beslem durumunda (Şekil 3.32.a ve Şekil 3.33) yarıiletken tarafındaki atomların iletkenlik bandı ve tüm enerji seviyeleri ‘eV’ kadar alçalır. Dolayısıyla yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli uygulanan V voltajı kadar azalır. Neticede yarıiletkenden metale akan hol (hol) sayısı $\exp(eV/kT)$ kadar artar. Yani yarıiletkenden metale doğru (hollerin hareket yönünde) olan akım $I=I_0$ değerinden $I'=I_0\exp(eV/kT)$ değerine çıkmış olur.

Bu esnada, zıt yönde metalden yarıiletkene doğru olan akımda (metalden yarıiletkene akan elektron sayısında) bir değişiklik olmaz. Yani $I = I_0$ olarak kalır.



Şekil 3.33. Metal/p-tipi yarıiletken kontağa doğru beslem uygulandığında oluşan akımlar.

Bu durumda kontakta oluşan net akım şu şekilde yazılabilir:

$$I_{\text{net}} = I' - I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] - I_0 \quad (3.26)$$

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.27)$$

Yukarıdaki denklem ideal bir diyet için geçerlidir. Yani $n = 1$ durumunda doğrudur.

Eğer idealite faktörü $n>1$ ise bunu denklem içerisinde ifade etmek gerekir ki bu da aşağıdaki gibi verilebilir:

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.28)$$

$$I_{\text{net}} = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.29)$$

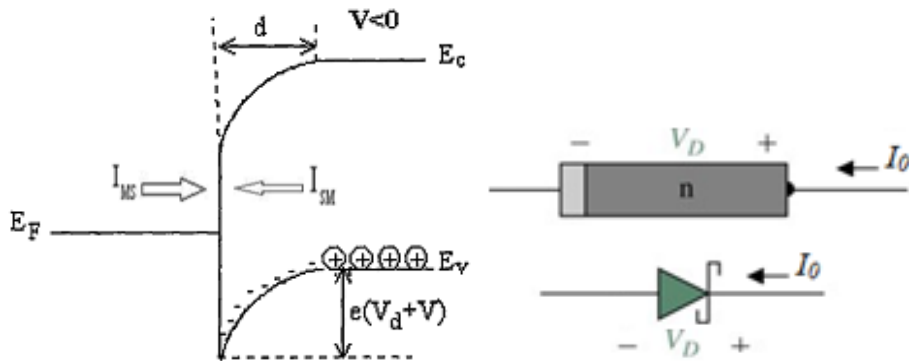
Burada $eV \gg kT$ durumunda (özellikle $eV > 3kT$ için), $\exp(eV/kT) \gg 1$ olacağından '1' ihmal edilip

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir.

Ters beslem durumunda (Şekil 3.32.b ve Şekil 3.34) ise, yarıiletken tarafındaki atomların iletkenlik bandı ve tüm enerji seviyeleri eV kadar yükselir. Dolayısıyla yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli uygulanan voltaj ($-V$) kadar artar. Neticede yarıiletkenenden metale akan hol sayısı $\exp(-eV/kT)$ kadar azalır. Yani yarıiletkenenden metale doğru olan akım $I=I_0$ değerinden $I'=I_0\exp(-eV/kT)$ değerine inmiş olur.

Bu esnada, zıt yönde metalden yarıiletkeneye doğru (hollerin hareket yönünde) olan akımda bir değişiklik olmaz. Yani $I=I_0$ olarak kalır.



Şekil 3.34. Metal/p-tipi yarıiletken kontağa ters beslem uygulandığında oluşan akımlar.

Bu durumda kontakta oluşan net akım şu şekilde yazılabilir:

$$I_{\text{net}} = I^+ - I = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) \right] - I_0 \quad (3.31)$$

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.32)$$

Burada $eV \gg kT$ durumunda (özellikle $eV > 3kT$ için), $\exp(-eV/kT) \ll 1$ olacağından $\exp(-eV/kT)$ ihmal edilip

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(-\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] = I_0 [0 - 1] = -I_0 \quad (3.33)$$

$$I_{\text{net}} = -I_0 \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Kısacası, $eV > 3kT$ için doğru beslem durumunda net akım;

$$I_{\text{net}} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.35)$$

olurken, ters beslem durumunda net akım;

$$I_{\text{net}} = -I_0 \quad (3.36)$$

şeklinde elde edilir.

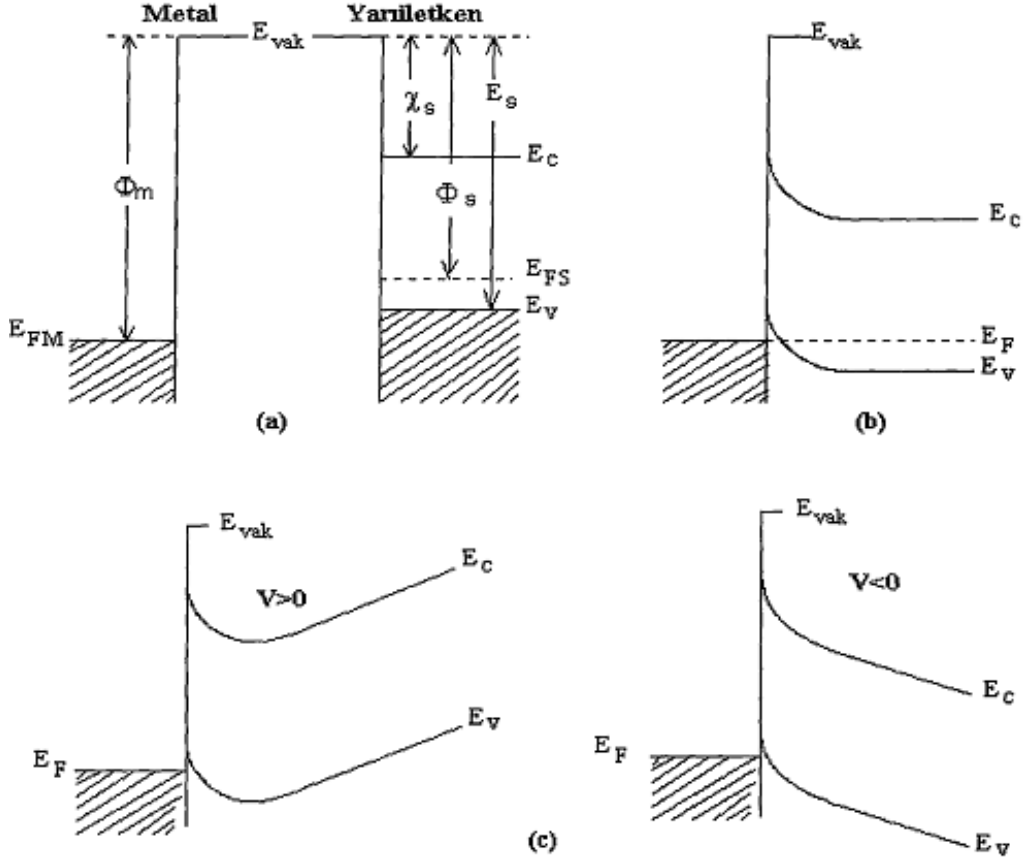
3.3.5. Metal/p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Al/p-Si, Au/p-Si gibi yapılardır. $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda oluşurlar.

Bu yapılarda metalden yarıiletkene geçişte ve yarıiletkenenden metale geçişte akım taşıyıcıların karşılaşacağı engel yükseklikleri arasında ciddi bir fark olmadığından akım yönden bağımsızdır. Dolayısıyla kontakta akım simetrik karakter gösterir.

Kontak bölgesinde tam bir temas ve iyi bir difüzyon sağlanmışsa iyi bir omik kontak oluşabilir.

Omik kontakta $\Phi_m > \Phi_s$ olduğundan kontak oluşumundan sonra yarıiletken metalde elektron geçişi (dolayısıyla metalden yarıiletken tarafına hol geçişi) olur ve yarıiletkende oluşan hollerin yerini yarıiletkendeki diğer elektronlar doldurur.



Şekil 3.35. Metal/p-tipi yarıiletken omik Schottky kontağın enerji-bant diyagramı: a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası termal dengeye ulaşılmışken, c) Doğru beslem için ve ters beslem için (Temirci, 2000).

Yukarıdaki Şekil 3.35'te de görüldüğü gibi, metalden p-tipi yarıiletken geçişte engel yüksekliği;

$$\Phi_{b,m} = \Phi_s - \chi_s \quad (3.37)$$

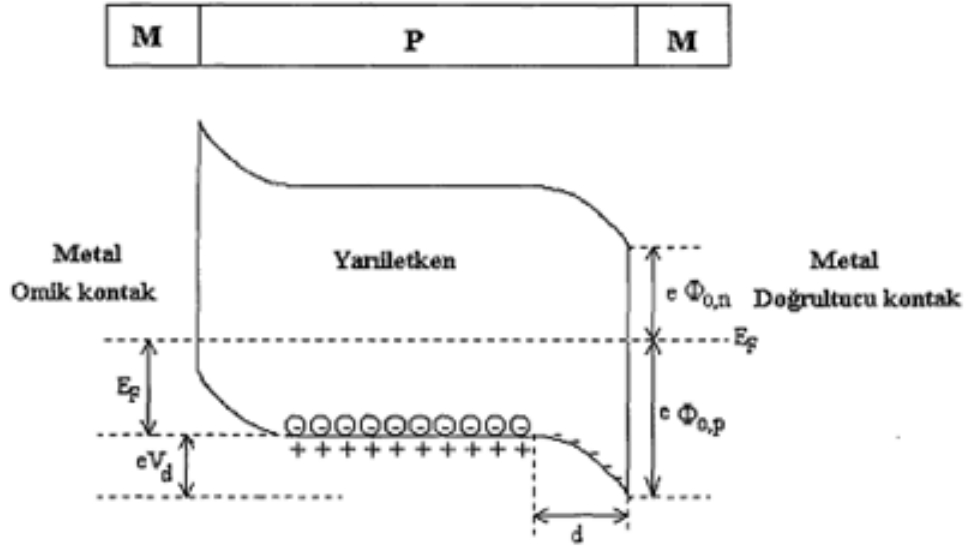
ile verilirken, p-tipi yarıiletken metale geçişte engel yüksekliği:

$$\Phi_{b,s} = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.38)$$

ile ifade edilir. $\Phi_{b,m}$ ve $\Phi_{b,s}$ arasında ciddi bir fark olmadığı için doğrultucu özellik oluşmaz ve kontak türü omik olur.

3.3.6. Metal (Omik)/p-tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) Yapı

Bu yapı bir p-tipi yarıiletkenin bir tarafına omik kontak yapabilecek uygun bir metal tabakası, diğer tarafına da doğrultucu kontak yapabilecek özellikte bir metal kaplayarak meydana getirilir (Şekil 3.36). $\Phi_m > \Phi_s$ olan bir metal iyi bir omik kontak elde etmek için yarıiletken içerisine iyice difüze olacak şekilde kontak yapılırken, metalin diğer tarafına $\Phi_m < \Phi_s$ olan bir metal, yarıiletken içerisine çok az difüze olacak şekilde kontak yapılır. Bu yapı diyot diye isimlendirilir.

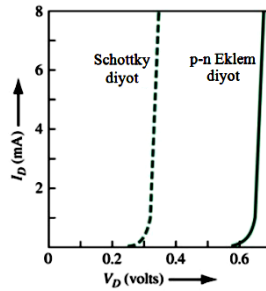


Şekil 3.36. Bir diyotun oluşumunda yarıiletkenin iki tarafının bant yapısının sembolik olarak gösterimi (Temirci, 2000).

2.3.7 Schottky Kontaklar ile p-n Eklemlerin Karşılaştırılması

Schottky kontaklar ve p-n eklemler (pnE) diyotturlar, ama aralarında bazı farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar yüzünden kullanım alanları farklı olur. Aralarındaki farkları kısaca şöyle sıralayabiliriz:

1. Schottky kontakta eklem bir tarafı iletken (genelde metal), diğer tarafı yarıiletken iken, pnE'de eklem her iki tarafı da yarıiletken malzemedir.
2. Ters beslem akımını, Schottky kontakta potansiyel engelini aşabilen çoğunluk yük taşıyıcılar oluştururken, pnE'de potansiyel engelini aşabilen arınma bölgesine difüzyonla sızan azınlık yük taşıyıcılar oluşturur.
3. Bir önceki maddede ifade edilen sebepten dolayı Schottky kontaklar sıcaklıktan az etkilenirken, pnE'ler sıcaklıktan şiddetle etkilenirler.
4. Doğru beslem akımı, Schottky kontakta yarıletkenden sadece çoğunluk yük taşıyıcılar ile oluşurken, pnE'de hem n-tipi hem de p-tipi yarıletkenden çoğunluk yük taşıyıcıları ve azınlık yük taşıyıcı enjeksiyonu ile oluşur.
5. Aygıtı iletken yapmak için gereken doğru beslem potansiyeli Schottky kontakta küçük iken, pnE'de yüksektir (Şekil 3.37).
6. Açma-kapama zamanı Schottky kontakta potansiyel engelini geçen 'sıcak' (yüksek enerjili) elektronların termalizasyonu ile kontrol edilirken, pnE'de arınma bölgesine enjekte olmuş azınlık yük taşıyıcıları ile kontrol edilir.
7. Bir önceki maddede zikredilen sebepten dolayı açma-kapama zamanı Schottky kontakta piko saniye mertebesinde iken pnE'de bu süre nano saniye mertebesinde olur.
8. Schottky kontakta arınma bölgesinde rekombinasyon olayları hiç yok iken, pnE'de mevcuttur.
9. Bir önceki maddede zikredilen sebepten dolayı idealite faktörü Schottky kontakta 1 civarında iken, pnE'de yaklaşık olarak 1.2-2.0 civarındadır.
10. Maliyet ve üretim zamanı açısından SDK'lar nispeten ucuz olup hızlı üretilirken, pnE'ler pahalıya mal olur ve üretimleri uzun sürer.
11. SDK'ta doyma akımı pnE'dekine nispeten çok daha büyük değerler alır.



Şekil 3.37. Schottky doğrultucu kontak ile p-n eklemelerinin doğru beslem akımlarının temsili karşılaştırılması (Neamen, D., 2009)

Au/PANI/p-Si/Al yapısı aslında bir p-n eklem benzetmekle birlikte düşük voltajlarda (0.5-3 V) Schottky diyot yaklaşımı, p-n eklem yaklaşımı ile aşağı yukarı aynı sonuçları verir. Bu yüzden p-n eklem yaklaşımındaki

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_e}{L_e N_A} + \frac{D_h}{L_h N_D} \right) \quad (3.39)$$

doyma akımı ifadesi yerine Schottky diyot yaklaşımındaki

$$I_0 = AA^*T^2 \left[\exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \quad (3.40)$$

doyma akımı ifadesini kullanmak hesaplarda kolaylık olması açısından tercih edilir (Sağlam, 2004).

3.4 Schottky Kontaklarda Akım Taşıma Teorileri

Schottky kontaklarda akım iletimini açıklamaya çalışan teorilerden üç tanesi aşağıda verilmiştir.

3.4.1. Termiyonik Emisyon Teorisi

Termiyonik emisyon teorisi için temel varsayımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) $e\Phi_b$ engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür ($e\Phi_b \gg kT$).
- 2) Tüketim bölgesi içerisindeki elektron çarpışmaları ihmal edilir.
- 3) Hayali kuvvetin etkisi de ihmal edilir.

Yukarıdaki varsayımlardan dolayı, akım iletimi sadece engel yüksekliğine (şekli önemli değildir) bağlıdır. Yarıiletken metale doğru olan $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, bu durumda, standart-termiyonik emisyon denklemi ile verilir (Bethe, 1942).

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (3.41)$$

Doyma akım yoğunluğunu veren ifade

$$J_{0,T} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.42)$$

olup, buradaki A^* Richardson sabitidir ve açık biçimi aşağıda verilmiştir (Dündar, 2007):

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.43)$$

3.4.2. Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisi için temel varsayımlar kısaca şöyle sıralanabilir (Crowell ve ark., 1966):

- 1) $e\Phi_b$ engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür ($e\Phi_b \gg kT$).
- 2) Tüketim bölgesindeki elektron çarpışmalarının etkisi göz önüne alınır.
- 3) $x=0$ ve $x=w$ 'daki (yani arınma bölgesi sınırlarındaki) taşıyıcı yoğunlukları akım iletimi ile değişmez, yani denge değerlerine sahiptirler.
- 4) Yarıiletkenin safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Tüketim tabakasındaki akım, lokal alana ve konsantrasyon değişimine bağlı olduğundan, akım yoğunluk denklemi kullanılmalıdır. O da şu şekilde ifade edilebilir:

$$J = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \right) \left(\frac{q(V_{bi} - V) \beta \pi N_D}{\epsilon_s} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.44)$$

Burada doyma akım yoğunluğunu veren ifade de aşağıdaki gibi olur:

$$J_{0,D} = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \right) \left(\frac{q(V_{bi} - V) \beta \pi N_D}{\epsilon_s} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.45)$$

Aslında form olarak termiyonik emisyon akım yoğunluğu ($J_{0,T}$) ile difüzyon akım yoğunluğu ($J_{0,D}$) birbirine bezer. Fakat $J_{0,T}$ sıcaklığa şiddetle bağlı iken, $J_{0,D}$ ise gerilimdeki değişimlerden çabuk etkilenir.

3.4.3 Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi

Termiyonik emisyon ve difüzyon teorilerinin bir sentezidir. Metal-yarıiletken arayüzeyi yakınındaki termiyonik v_R yeniden birleşme hız sınır şartından türetilir (Aydoğan ve ark., 2005).

Ayrıca, metal-yarıiletken arayüzeyindeki kuantum mekaniksel yansıma ve elektron optik-fonon saçılma etkileri de göz önüne alınır.

Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi için akım yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$J = \left(\frac{qN_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.46)$$

Buradaki v_R - termiyonik yeniden birleşme hızı, v_D - difüzyon kaynaklı yeniden birleşme hızı olarak isimlendirilip 10^6 - 10^7 cm/s mertebelerindedir. Bu iki terim aşağıdaki şekilde hesaplanırlar:

$$v_R = \frac{A^* T^2}{qN_c} \quad (3.47)$$

$$v_D = \mu E \quad (3.48)$$

Burada iki durum söz konusudur:

- 1) $v_R \leq v_D$ ise termiyonik emisyon baskındır.
- 2) $v_R > v_D$ ise difüzyon baskındır.

Difüzyonun baskın olduğu ikinci durum için akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki sade biçimi ile verilebilir:

$$J \cong qN_c v_D \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.49)$$

Buradaki $v_D = \mu E$ olduğundan, yukarıdaki 3.49 denklemi şu şekle dönüşür:

$$J \cong qN_c \mu E \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.50)$$

Doyma akımı yoğunlukları da şu şekilde verilebilir:

1) $v_R \leq v_D$ için:

$$J_0 = \left(\frac{qN_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.51)$$

2) $v_R > v_D$ için:

$$J_0 \cong qN_c \mu E \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.52)$$

3.5. Akım-Voltaj Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Akım-voltaj karakteristikleri ($\ln I$ - V grafiği) ile hesaplanabilen diyot parametreleri:

- 1) İdealite faktörü (n)
- 2) Doyma akımı (I_0)
- 3) Engel yüksekliği (Φ_b)

Cheung fonksiyonları ($(dV/d\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri) ile hesaplanabilen diyot parametreleri:

- 1) İdealite faktörü (n)
- 2) Engel yüksekliği (Φ_b)
- 3) Seri direnç (R_s)

Hem akım-voltaj karakteristikleri, hem de Cheung fonksiyonları kullanılıp grafikler çizildiğinde, eğimler sadece grafiklerin doğrusal oldukları bölgeler için hesaplanır.

3.5.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir Schottky diyotun 3.13'te verilen karakteristik akım denklemi aşağıdaki gibidir:

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

Termiyonik emisyon teorisinin şartları göz önüne alındığında, $eV \gg kT$ gereği denklemdeki '-1' ifadesi ihmal edildiğinde, 3.13'te verilen şu denklem elde edilir:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)$$

Şimdi her iki tarafın $\ln$ 'ni alınırsa:

$$\ln I = \ln \left[I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] = \ln I_0 + \ln \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (3.53)$$

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eV}{nkT} \quad (3.54)$$

elde edilir. Bu ifadede değişen voltajla beraber akım da değiştiğinden, $\ln I$ - V grafiği çizildiğinde:

- 1) Voltajın $V=0$ volt değeri için grafiğin $\ln I$ eksenini kestiği noktayı kullanarak
 - a. I_0 doyma akımı bulunabilir.
 - b. I_0 doyma akımını kullanarak da Φ_b engel yüksekliği hesaplanabilir.

3.9 denklemi ele alınıp yeniden düzenlenirse basamaklar halinde aşağıdaki denklemlere ulaşılır:

$$I_0 = AA^*T^2 \left[\exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right]$$

$$\frac{I_0}{AA^*T^2} = \left[\exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \quad (3.55)$$

$$\ln \frac{I_0}{AA^*T^2} = \ln \left[\exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \quad (3.56)$$

$$\ln \frac{I_0}{AA^*T^2} = - \frac{e\Phi_b}{kT} \quad (3.57)$$

$$- \ln \frac{I_0}{AA^*T^2} = \frac{e\Phi_b}{kT} \quad (3.58)$$

$$\ln \frac{AA^*T^2}{I_0} = \frac{e\Phi_b}{kT} \quad (3.59)$$

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln \frac{AA^*T^2}{I_0} \quad (3.60)$$

lnI-V grafiğinin kesim noktasından bulunan I_0 akımı ve en son bulunan denklem kullanılarak engel yüksekliği hesaplanabilir.

2) Her iki tarafın voltaja göre türevi alınır, grafiğın eğimi $\left(\frac{d(\ln I)}{dV} \right)$ vasıtasıyla idealite faktörü (n) hesaplanabilir

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eV}{nkT} \quad (3.61)$$

$$\frac{d(\ln I)}{dV} = \frac{d(\ln I_0)}{dV} + \frac{e}{nkT} \quad (3.62)$$

$$\frac{d(\ln I)}{dV} = 0 + \frac{e}{nkT} \quad (3.63)$$

$$n = \frac{e}{kT \left[\frac{d(\ln I)}{dV} \right]} \quad (3.64)$$

Bir doğrultucu kontağın idealite faktörü, $\ln I$ - V grafiğinin eğimi ve yukarıda verilen son denklem ile bulunabilir.

3.5.2. Cheung Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Diyot parametrelerinin (n , Φ_b ve R_s) bulunması için aşağıda verilen metotlar Cheung ve Cheung tarafından 1986'da geliştirilmiştir.

Schottky diyotun 3.13'te verilen karakteristik akım denklemindeki doyma akımı (I_0) ifadesi açılırsa 3.14 denklemi elde edilir. Termiyonik emisyon teorisinin kabulleri gereği (yani $eV \gg kT$) denklemdeki '-1' ifadesi ihmal edilebilir. O zaman denklem şu hale döner:

$$I = AA^* T^2 \left[\exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) \quad (3.65)$$

Diyottaki seri direncin de voltaj kaybına sebep olacağı hesaba katıldığında denklemimiz şu hale gelir:

$$I = AA^* T^2 \left[\exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right] \quad (3.66)$$

Her iki tarafın $\ln$ 'i alınıp işlem sonuna kadar götürülürse,

$$\ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) = \ln \left[\exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] + \ln \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right] \quad (3.67)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{e(V - IR_s)}{nkT} \quad (3.68)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{IR_s}{nkT} \quad (3.69)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) - \frac{eV}{nkT} = -\frac{e\Phi_b}{kT} - \frac{IR_s}{nkT} \quad (3.70)$$

$$\frac{eV}{nkT} - \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{IR_s}{nkT} \quad (3.71)$$

$$V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.72)$$

denklemini elde edilir. Bu noktadan sonra yukarıdaki denklem iki türlü kullanılabilir:

- 1) Denklem, V'yi yalnız bırakacak şekilde düzenlenip her iki tarafın $\ln I$ 'ya göre türevi alınır. (V ve I dışındaki tüm parametreler sabittir.)

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.73)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln I - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln(AA^*T^2) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.74)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{\ln I}{d(\ln I)} - \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{d[\ln(AA^*T^2)]}{d(\ln I)} + \frac{d(n\Phi_b)}{d(\ln I)} + \frac{d(IR_s)}{d(\ln I)} \quad (3.75)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) - 0 + 0 + R_s \frac{dI}{d(\ln I)} \quad (3.76)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e} \right) + R_s \left[\frac{1}{\frac{d(\ln I)}{dI}} \right] \quad (3.77)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e} \right) + R_s \left[\frac{1}{I} \right] \quad (3.78)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e} \right) + IR_s \quad (3.79)$$

Elde edilen son 3.79 numaralı denklem 1. Cheung&Cheung fonksiyonudur. Bu denklem

vasıtasıyla $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiği çizilirse iki parametreye ulaşılabilir:

- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin eğimi ile doğrudan doğruya seri direnç (R_s) değeri bulunur.
- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin düşey eksenini kestiği nokta vasıtasıyla idealite faktörü (n) bulunur. Bulunan bu n -idealite faktörü daha sonra aşağıda gösterilen 2. Cheung&Cheung fonksiyonunda kullanılmak suretiyle seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) hesaplanabilir.

2) Denklemden, eşitliğin sol tarafı $H(I)$ diye isimlendirilirse, nihai denklem formu şu olur: (V ve I dışındaki tüm parametreler sabittir.)

$$V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.80)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.81)$$

Elde edilen son denklem (3.81 nolu denklem) 2. Cheung&Cheung fonksiyonudur. Bu denklem vasıtasıyla $H(I) - I$ grafiği çizilirse iki parametreye ulaşılabilir:

- $H(I) - I$ grafiğinin eğimi ile doğrudan doğruya seri direnç (R_s) değeri bulunur.
- $H(I) - I$ grafiğinin düşey ekseni kestiği nokta ve 1. Cheung&Cheung fonksiyonu vasıtasıyla hesaplanmış olan idealite faktörü (n) kullanılarak engel yüksekliği (Φ_b) hesaplanabilir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Giriş

Bu bölüm Au/PANI/p-Si Schottky kontağın yapımı için izlenen yöntemleri içerir. Bu çalışmada kullanılan kontaklar, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken İşlem Laboratuvarı'nda bulunan 'EDWARDS Auto-306 Turbo Moleküler Pompalama Sistemli Vakum Kaplayıcı' (Auto-306 Coater With Turbo Molecular Pumping System) adlı cihaz kullanılarak üretilmiştir. Yapılan numunelerden 'Keithley 6487 Pikoampermetre/Voltaj Kaynağı' (Keithley 6487 Picoammeter/Voltage Source) cihazı ile alınan ölçümler sonucu elde edilen diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç) ve karakteristikleri bu bölümde yer almaktadır. Kontaklı oluşturan malzemelerin üstten alta doğru sıralanışı (omik) Au/PANI/p-Si/Al (omik) şeklinde olup, kısaca Au/PANI/p-Si diye ifade edilir.

4.2. Numunelerin Temizlenmesi ve Hazırlanması

4.2.1. p-Si [100] Kristalinin Kimyasal Olarak Temizlenmesi

Bu bölümde [100] doğrultusunda büyütülmüş, öz direnci $\rho = 5-10 \Omega \cdot \text{cm}$ olan Bor (B) katkılı p-tipi silisyum kullanıldı. Kontak yapımında kullanılan numunenin daha ideal sonuçlar verebilmesi için yüzeyinin organik, nativ oksit ve mekanik kirlerden temizlenmesi şart olduğundan numuneler kimyasal olarak temizlendi.

Fabrikasyon olarak p-Si'un yüzeyinin mekanik olarak parlatılması işlemi zaten yapılmış olduğundan ve dolayısıyla yüzey zaten parlak olduğundan mekanik parlatmaya ihtiyaç hissedilmedi.

Kimyasal temizlemede kullanılan prosedürler aşağıda verilmiştir:

- 1) Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2) Metanolda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4) RCA1 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3;6:1:1$) prosedürü ile 60°C 'de 10 dakika yıkandı.
- 5) Seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF};10:1$) ile 30 saniye yıkandı.
- 6) RCA2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl};6:1:1$) prosedürü ile 60°C 'de 10 dakika kaynatıldı.

- 7) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8) Seyreltik HF ($H_2O:HF;10:1$) ile 30 saniye yıkandı.
- 9) 15-20 dakika boyunca akan deiyonize su içerisinde tutuldu.
- 10) Azot gazı (N_2) ile kurutuldu.

Ayrıca buharlaştırmada kullanılacak metaller metanolda 5 dakika boyunca ultrasonik olarak yıkandı.

4.2.2. p-Si [100] Kristaline Alüminyum (Al) Omik Kontak Yapılması

Kontağın iyi bir omik karakter gösterebilmesi, Al'un p-Si içerisine iyice difüze olması ile ilgilidir. Bu da şöyle mümkündür:

- 1) Omik kontak p-Si'un mat (pürüzlü, girintili çıkıntılı) tarafına yapılmalıdır.
- 2) Buharlaştırılan Al'un p-Si içerisine iyice difüze olması için buharlaştırma esnasında örnek tutucu ısıtıcıya yakın tutulmalıdır.

Omik (p-Si/Al) kontak yapma prosedürü ise aşağıdaki gibidir.

- 1) Buharlaştırma ünitesinde bulunan ve buharlaştırılacak malzemenin (Al) konacağı tungsten ısıtıcı:
 - a. Önce % 10'luk HCl ile yıkandı.
 - b. Deiyonize su ile iyice yıkanıp temizlendi.
 - c. Hemen kurutuldu ve buharlaştırma ünitesine yerleştirildi.
 - d. Muhtemel kirlilik kalıntılarını gidermek için buharlaştırma ünitesi çalıştırılıp vakum yapıldı ve ısıtıcıya (henüz boş iken) elektrik verilerek ısıtıldı.
 - e. Sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 2) Omik kontak yapımı için kullanılacak % 99.98'lik Al ısıtıcıya yerleştirildi.
- 3) Numune tutucu ısıtıcıya yakın mesafeye getirildi.
- 4) Üzerine omik kontak yapılacak olan p-Si, mat yüzeyi aşağı doğru (Al'a doğru) bakacak şekilde numune tutucuya yerleştirildi.
- 5) Buharlaştırma ünitesinin cam fanusu kapatılıp vakum 'EDWARDS Auto-306 Turbo Moleküler Pompalama Sistemli Vakum Kaplayıcı' (EDWARDS Auto 306 Vacuum Coater with Turbo Molecular Pumping System) cihazı çalıştırılarak vakumun 10^{-5} Torr mertebesine inmesi beklendi.

- 6) Basınç 10^{-5} Torr mertebesine ulaşınca ısıtıcı tungsten flamaya çok kısa süreliğine akım verilerek % 99.98'lik Al, p-Si'un mat yüzeyine kaplandı.
- 7) Bir müddet bekledikten sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 8) Omik kontak yapılmış olan (p-Si/Al) numune tutucudan alınıp önceden kimyasal olarak temizlenmiş olan kuartz potanın içine konularak fırına sürüldü ve 580°C 'de 3 dakika boyunca tavlandı.
- 9) Böylece omik kontak tamamlandıktan sonra p-Si/Al numunesi, üzerine ayrı doğrultucu kontak numuneleri yapılmak üzere 3 parçaya ayrıldı.

4.2.3. p-Si [100] Kristaline Doğrudan PANI İlavesi ile Doğrultucu Kontak Yapılması

Kontağın iyi bir doğrultucu karakter gösterebilmesi, PANI'nin p-Si içerisine çok az difüze olmasına bağlıdır. Bu da şöyle mümkündür:

- 1) Doğrultucu kontak, p-Si'un parlak ve pürüzsüz yüzüne PANI ilave edilerek yapılmalıdır.
- 2) Buharlaştırılan Au'nın PANI'ni aşır p-Si'a ulaşmaması için buharlaştırma esnasında numune tutucu ısıtıcıya uzak tutulmalıdır.

PANI/p-Si doğrultucu kontak yapma prosedürü ise aşağıdaki gibidir.

- 1) Fırından alınıp 3 parçaya ayrılan p-Si/Al numuneleri aşağıda verilen aşamalarla kimyasal olarak temizlendi:
 - a. Doğrudan PANI ilavesinin yapılacağı p-Si yüzeyinin nativ oksit tabakası önce % 10'luk HF çözeltisi ile (Al omik kontak yapılan kısma zarar vermeden) olarak temizlendi.
 - b. Kimyasal olarak temizlenen p-Si/Al numuneleri bol miktarda deiyonize suyla yıkandı.
 - c. Yıkanan numuneler oksit tabakası yeniden oluşmasın (veya çok daha az oluşsun) diye azot gazında (N_2) kurutuldu.
 - d. Kimyasal olarak temizlenip kurutulan p-Si/Al numunelerinin her birine farklı PANI çözeltileri, p-Si'un parlak yüzeyine doğrudan ilave edilerek

kurumaya terk edildi. Kullanılan PANI çözeltileri hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

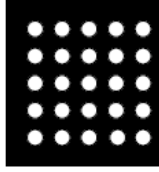
- i. 1. Numune (A) için: Aldrich, 530565 Polianilin (emeraldin tuzu) (Toz)
 1. İletkenlik: 30 S/cm
 2. Erime noktası: $> 300^{\circ}\text{C}$ 'den fazla
 3. Kuru toz, DMF ile karıştırılıp 2mg/ml'lik PANI/DMF çözeltisi yapıldı.
- ii. 2. Numune (B) için: Aldrich, 650513 Polianilin (emeraldin tuzu) (Hazır çözelti)
 1. İletkenlik: 10-20 S/cm
 2. Parçacık boyutu: 400 nm'den küçük
 3. Erime noktası: 300°C 'den fazla
 4. Yoğunluk: 0.90-0.95 g/mL (25°C 'de)
 5. Hazır çözelti kullanıldı.
- iii. 3. Numune (C) için: Aldrich, 649996 Polianilin (emeraldin tuzu) (Hazır çözelti)
 1. İletkenlik: Yaklaşık olarak 1 S/cm
 2. Parçacık boyutu: 25-35 nm'den küçük
 3. Erime noktası: 300°C 'den fazla
 4. Yoğunluk: 0.804 g/mL (25°C 'de)
 5. Hazır çözelti kullanıldı.
- e. Kurutma işlemi oda sıcaklığında ve 24 saat sürdü.

4.2.4. PANI/p-Si'a Altın (Au) Üst (Omik) Kontak Yapılması

PANI/p-Si'a Au üst (omik) kontak yapılırken takip edilen basamaklar:

- 1) Buharlaştırma ünitesinde bulunan ve buharlaştırılacak malzemenin (Au) konacağı tungsten ısıtıcı:
 - a. Önce % 10'luk HCl ile yıkandı.
 - b. Deiyonize su ile iyice yıkanıp temizlendi.
 - c. Hemen kurutuldu ve buharlaştırma ünitesine yerleştirildi.

- d. Muhtemel kirlilik kalıntılarını gidermek için buharlaştırma ünitesi çalıştırılıp vakum yapıldı ve ısıtıcıya (henüz boş iken) elektrik verilerek ısıtıldı.
- e. Sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.
- 2) Omik Au üst kontak yapımı için kullanılacak % 99.99'lik Au ısıtıcıya yerleştirildi.
- 3) Au'nın PANI'yi aşp p-Si ile doğrudan kontak yapmaması için numune tutucu ısıtıcıdan uzak mesafeye yerleştirildi.
- 4) Her bir deliği 1 mm çapında olan şekil 4.1'de verilen maske, uygun kontaklar yapabilmek için numune tutucuya yerleştirildi (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Numunelerde üst Au kontakların oluşturulması için kullanılan delik çapı 1mm olan maske.

- 5) Üzerine omik üst Au kontak yapılacak olan PANI/p-Si'un, PANI tarafı aşağı doğru (Au'a doğru) bakacak şekilde numune tutucudaki maskenin üzerine yerleştirildi.
- 6) Buharlaştırma ünitesinin cam fanusu kapatılıp vakum 'EDWARDS Auto-306 Turbo Moleküler Pompalama Sistemli Vakum Kaplayıcı' (EDWARDS Auto 306 Vacuum Coater with Turbo Molecular Pumping System) cihazı çalıştırılarak vakumun 10^{-5} torr mertebesine kadar inmesi beklendi.
- 7) Basınç 10^{-5} Torr mertebesine ulaşınca, ısıtıcı tungsten flamaya çok kısa süreliğine akım verilerek % 99.99'lik Au, PANI/p-Si'un PANI yüzeyine maskenin delikleri üzerinden kaplanıp kontak noktaları oluşturuldu.
- 8) Bir müddet bekledikten sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı.

4.3 Ölçüm Alma

Numunelerin akım-voltaj (I-V) ölçümleri için Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Yarıiletken İşlem Laboratuvarı'nda bulunan 'Keithley 6487 Pikoampermetre/Voltaj Kaynağı' (Keithley 6487 Picoammeter/Voltage Source) cihazı kullanıldı.

5. BULGULAR

‘Keithley 6487 Pikoampermetre/Voltaj Kaynağı’ cihazı ile alınan I-V ölçümleri iki şekilde kullanıldı:

- 1) Akım-voltaj karakteristikleri ile diyot parametrelerinden n ve Φ_b bulundu.
- 2) Cheung&Cheung fonksiyonları ile diyot parametrelerinden n , Φ_b ve R_s bulundu.

5.1. Akım -Voltaj (I-V) Ölçümlerinin Kullanılması

Bir Schottky diyotun karakteristik akım denklemi aşağıdaki gibidir.

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

Termiyonik emisyon teorisinin şartları göz önüne alındığında denklemdeki ‘-1’ ifadesi ihmal edilebilirse denklem şu şekle indirgenir:

$$I = I_0 \exp \left(\frac{eV}{nkT} \right)$$

Buradan işleme devam edilirse, kontağın idealite faktörü için,

$$n = \frac{e}{kT \left[\frac{d(\ln I)}{dV} \right]}$$

elde edilir. Engel yüksekliği için ise,

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln \frac{AA^* T^2}{I_0}$$

ifadesi bulunur. $\ln I$ -V grafiğinden n ve Φ_b değerleri hesaplanabilir.

Burada:

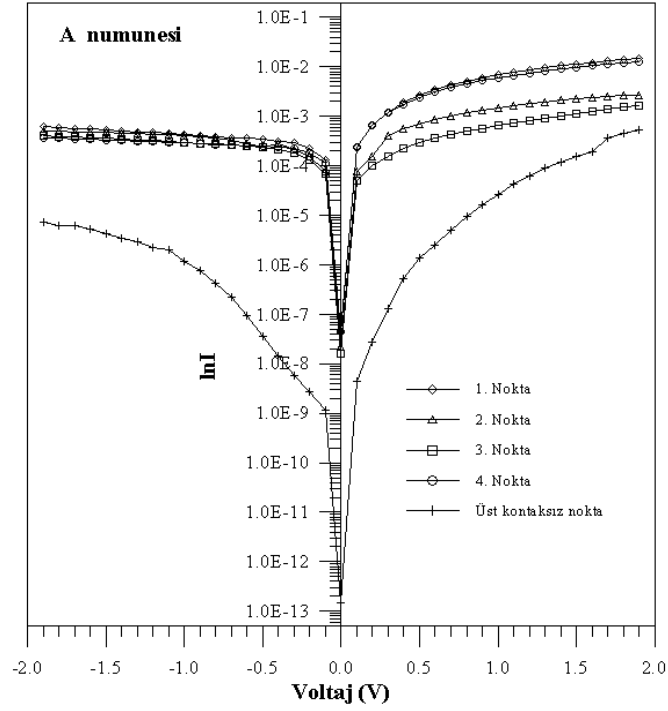
$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}, T = 300 \text{ K}, e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$A = \pi r^2 = 3,14 \cdot (1/2)^2 \text{ mm}^2 = 0,785 \text{ mm}^2 = 0,00785 \text{ cm}^2 = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$A^* = 55,80 \text{ A/(K}^2 \text{cm}^2)$ (Richardson sabiti) olarak alındı.

Bu Richardson sabiti $\ln(I_0/T^2) - 1/T$ grafiği ile değil, bunun modifiye şekli olan $\left[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_0^2/2k^2T^2\right] - 1/T$ grafiği ile bulundu (Aydoğan ve ark., 2005).

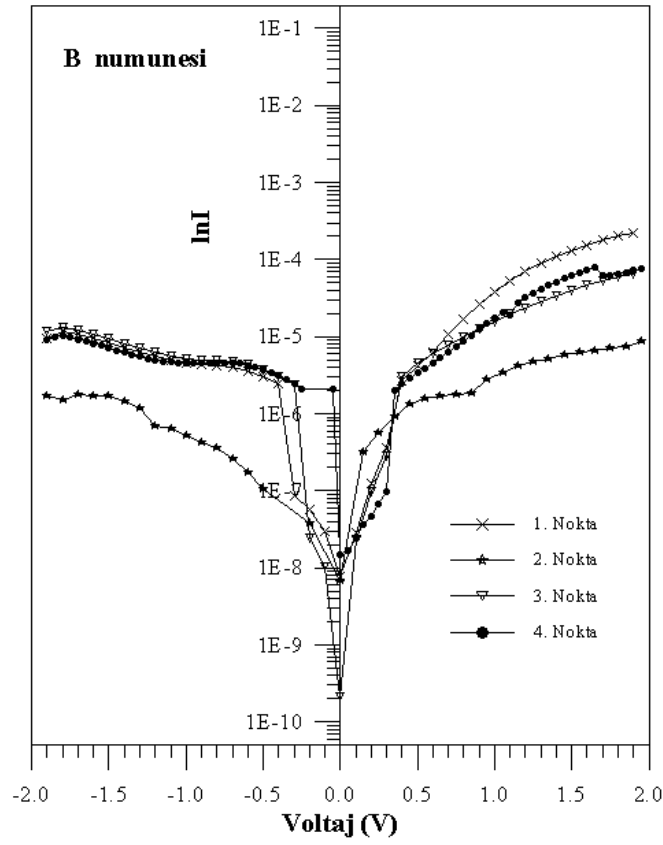
‘Keithley 6487 Pikoampermetre/Voltaj Kaynağı’ cihazı ile alınan ölçümler kullanılarak her bir numuneye (A, B, C) ait $\ln I$ -V grafikleri çizildi. Aşağıda sırasıyla A, B ve C numunelerine ait tüm grafikler sırasıyla verilmiştir.



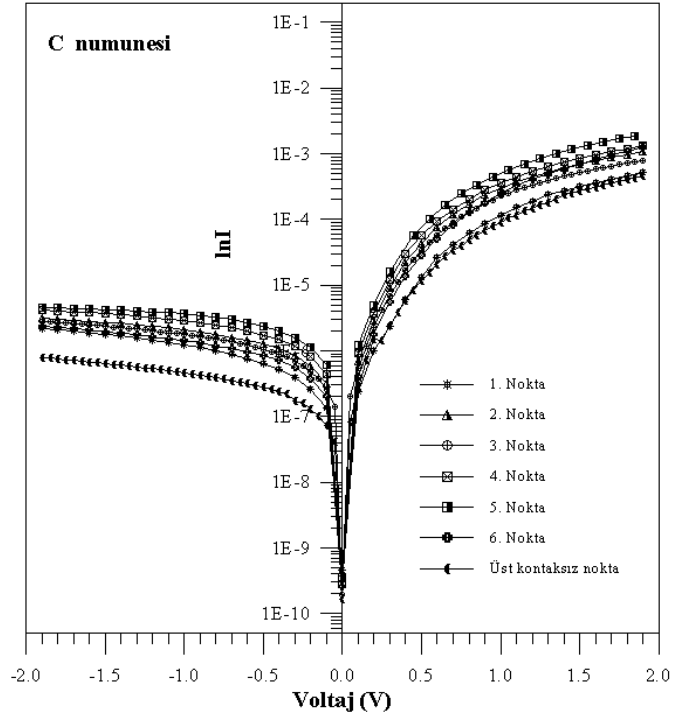
Şekil 5.1. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız noktanın $\ln I$ -V grafikleri.

$\ln I$ -V grafiklerini 3 bölgeye ayırıp incelemek mümkündür (C. Temirci, sözlü görüşme):

1. Düşük voltaj bölgesi: Sıfır volttan başlayıp grafiğin lineer olan kısmına kadar uzanan eğri bölgesidir. Burada difüzyon olayları baskın olup, difüzyon teorisini uygulamak doğru olur.
2. Orta voltaj bölgesi: Grafiğin lineer bölgesidir. Isıl olaylar baskın olup termiyonik emisyon teorisini uygulamak doğru olur.
3. Yüksek voltaj bölgesi: Grafiğin en üst bölgesi olup lineerliğin bükülüp bozulduğu yerden başlar. Yarıiletken gövdenin seri direncinin etkisini gösterir.



Şekil 5.2. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın $\ln I$ -V grafikleri.



Şekil 5.3. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız noktanın $\ln I$ -V grafikleri.

A, B ve C numunelerine ait kontaklar için hesaplanan idealite faktörleri ve engel yükseklikleri aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 5.1. A numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Engel Yüksekliği (Φ_b) (eV)
A1	2,21	0,54
A2	3,00	0,55
A3	2,75	0,57
A4	2,14	0,54
A-Üst Kontaklı	2,29	0,81

Çizelge 5.2. B numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Engel Yüksekliği (Φ_b) (eV)
B1	2,83	0,76
B2	4,89	0,69
B3	3,23	0,76
B4	5,81	0,74

Çizelge 5.3. C numunesine ait kontaklar için I-V karakteristikleri ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Engel Yüksekliği (Φ_b) (eV)
C1	3,18	0,70
C2	2,56	0,68
C3	2,59	0,69
C4	3,21	0,70
C5	2,63	0,67
C6	2,62	0,67
C-Üst Kontaklı	2,54	0,70

5.2. Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması

Bir schottky diyotun karakteristik akım denkleminin termiyonik emisyon ve seri direnç hesaba katılarak yazılan açık şekli aşağıdaki gibidir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \right] \exp\left[\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right]$$

Buradan işleme devam edilirse, 1. Cheung&Cheung fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunur:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + IR_s$$

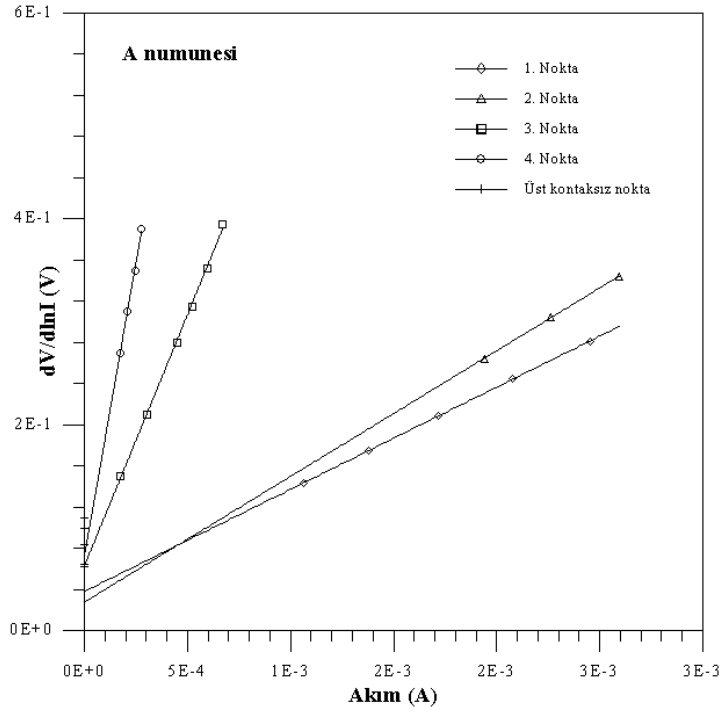
$\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiği çizilirse, n ve R_s değerleri hesaplanabilir. (Eğim vasıtasıyla R_s ,

kesim noktasından da n bulunur.)

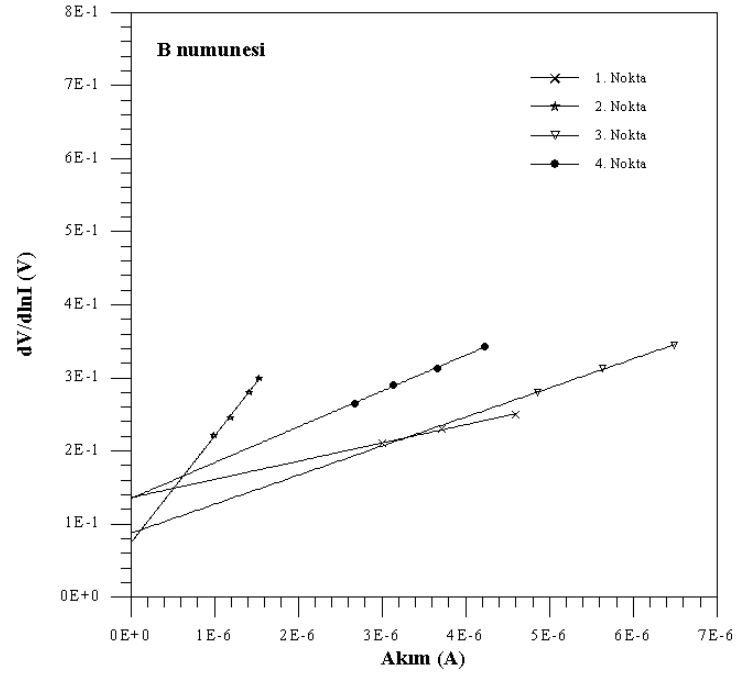
Alınan I-V ölçümleri kullanılarak her bir numuneye (A, B, C) ait

$\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafikleri çizildi. Aşağıda sırasıyla A, B ve C numunelerine ait tüm

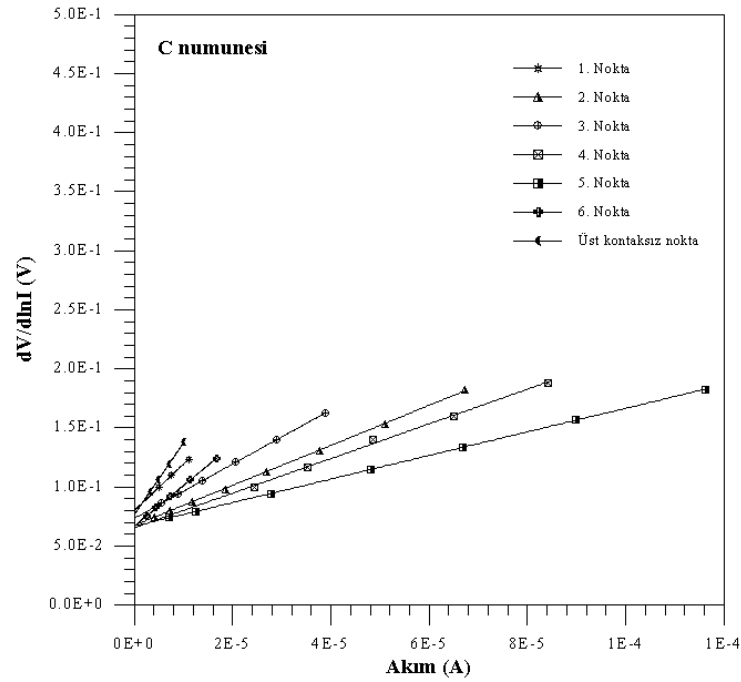
grafikler sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.4. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız noktanın $[dV/(d\ln I)]-I$ grafikleri.



Şekil 5.5. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın $[dV/(d\ln I)]$ -I grafikleri.



Şekil 5.6. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklı noktanın $[dV/(d\ln I)]$ -I grafikleri.

A, B ve C numunelerine ait kontaklar için hesaplanan idealite katsayıları ve engel yükseklikleri aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 5.4. A numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Seri Direnç (R _s) (Ω)
A1	1,46	99,44
A2	2,42	489,85
A3	2,85	1139,45
A4	1,08	121,89
A-Üst Kontaksız	2,25	35488,70

Çizelge 5.5. B numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Seri Direnç (R _s) (Ω)
B1	5,25	24995,50
B2	2,86	146384,00
B3	3,37	39775,40
B4	5,21	49031,90

Çizelge 5.6. C numunesine ait kontaklar için 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan idealite faktörleri (n) ve seri dirençleri (R_s)

Numune	İdealite Faktörü (n)	Seri Direnç (R _s) (Ω)
C1	3,10	3925,42
C2	2,61	1691,95
C3	2,84	2297,56
C4	2,97	99394,80
C5	2,59	1381,90
C6	2,58	998,47
C-Üst Kontaksız	2,59	3429,79

Bu bölümün başında verilen,

$$I = AA^* T^2 \left[\exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \right] \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right]$$

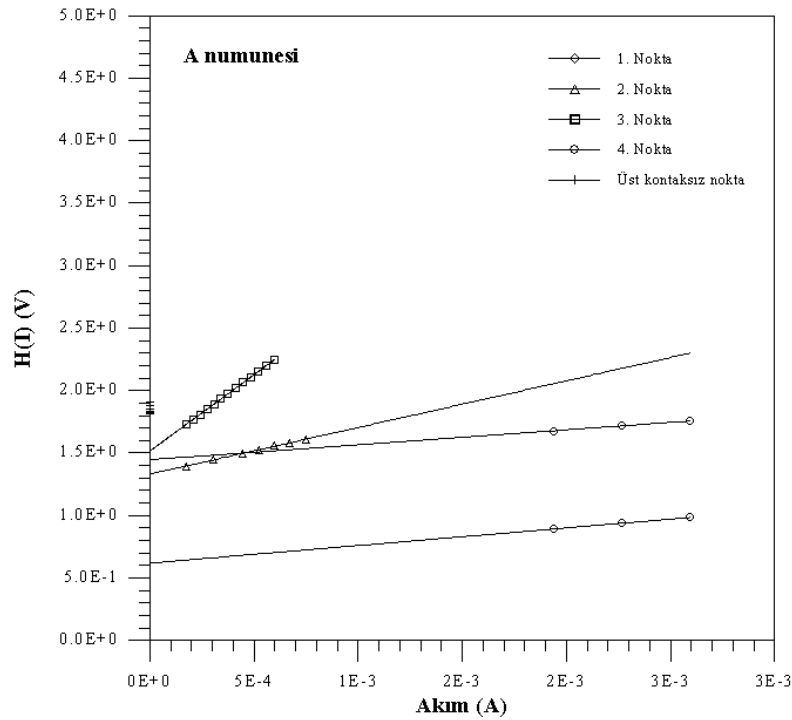
denkleminde işleme devam edilirse, 2. Cheung&Cheung fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunur:

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

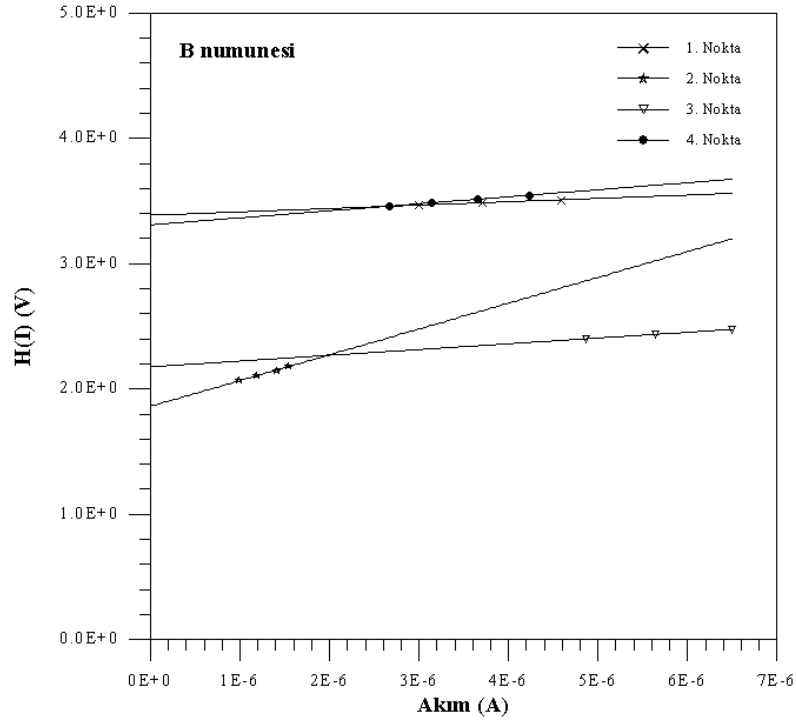
$H(I) - I$ grafiği çizilirse, 1. Cheung&Cheung fonksiyonundan elde edilen n değeri ve grafiğin $I=0$ iken düşey eksenini kestiği noktadan Φ_b engel yüksekliği değeri, grafiğin eğiminden de R_s hesaplanabilir.

Alınan $I-V$ ölçümleri kullanılarak her bir numuneye (A, B, C) ait $H(I) - I$ grafikleri çizildi.

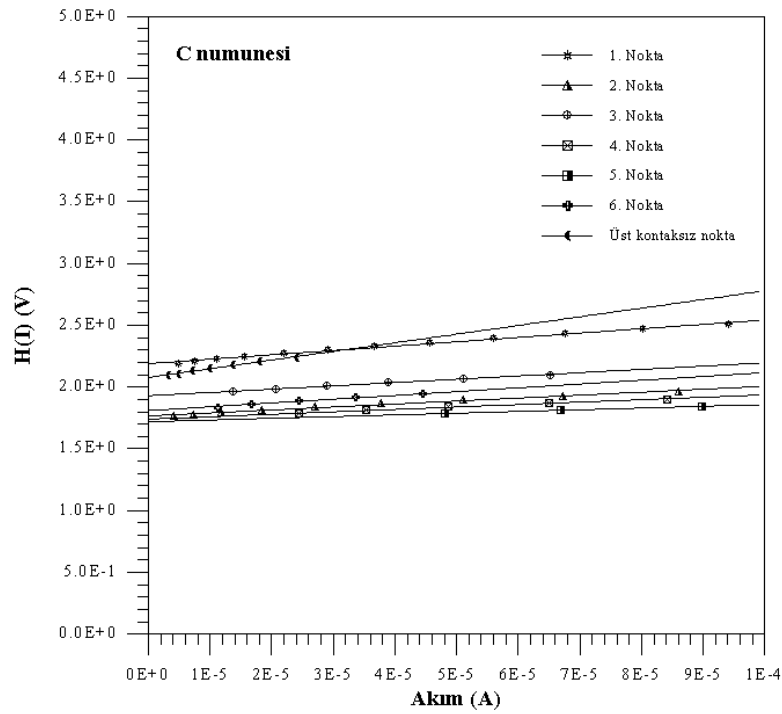
Aşağıda sırasıyla A, B ve C numunelerine ait tüm grafikler sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.7. A numunesine ait 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız noktanın $H(I)-I$ grafikleri.



Şekil 5.8. B numunesine ait 4 adet üst kontaklı noktanın $H(I)$ -I grafikleri.



Şekil 5.9. C numunesine ait 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaksız noktanın $H(I)$ -I grafikleri.

A, B ve C numunelerine ait kontaklar için hesaplanan idealite faktörleri ve engel yükseklikleri aşağıdaki çizelgelerde sunulmuştur.

Çizelge 5.7. A numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	Seri Direnç (R_s) (Ω)	Engel yüksekliği (Φ_b) (eV)
A1	121,12	0,55
A2	373,34	0,55
A3	1221,91	0,53
A4	140,89	0,57
A-Üst Kontaklı	63037,10	0,81

Çizelge 5.8. B numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	Seri Direnç (R_s) (Ω)	Engel yüksekliği (Φ_b) (eV)
B1	26907,80	0,64
B2	205666,00	0,65
B3	45890,00	0,65
B4	56171,30	0,64

Çizelge 5.9. C numunesine ait kontaklar için 2. Cheung&Cheung fonksiyonu ile hesaplanan seri direnç (R_s) ve engel yükseklikleri (Φ_b)

Numune	Seri Direnç (R_s) (Ω)	Engel yüksekliği (Φ_b) (eV)
C1	3404,82	0,71
C2	2115,42	0,68
C3	2673,33	0,68
C4	130650,00	0,69
C5	1969,83	0,67
C6	1272,07	0,67
C-Üst Kontaklı	7005,92	0,70

Görüldüğü gibi, aynı numune içerisinde üst kontaklı noktaların engel yükseklikleri birbirine çok yakın değerler alırken seri dirençler arasında ciddi farklılıklar mevcut.

Herhangi bir kontak için farklı yollarla elde edilen engel yükseklikleri arasında çok ciddi farklar mevcut değil. Ancak idealite faktörleri ve seri dirençler için aynı şeyler söylenemez. İdealite faktörleri bazı noktalar için % 50 kadar fark edebilmektedir. Seri dirençlerde ise, bir kontak için iki farklı yolla yapılan hesaplamalarda bulunan değerler arası fark %15-20 civarındadır.

Çizelge 5.10. A, B ve C numunelerine ait kontaklar için I-V karakteristikleri, Cheung&Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s) ve engel yükseği (Φ_b) değerleri

Numune	İdealite Faktörü (n)		Seri Direnç (R_s)		Engel yükseği (Φ_b)	
	I-V	Cheung 1	Cheung 1	Cheung 2	I-V	Cheung 2
A1	2,21	1,46	99,44	121,12	0,54	0,55
A2	3,00	2,42	489,85	373,34	0,55	0,55
A3	2,75	2,85	1139,45	1221,91	0,57	0,53
A4	2,14	1,08	121,89	140,89	0,54	0,57
A-Üst						
Kontaksız	2,29	2,25	35488,70	63037,10	0,81	0,81
B1	2,83	5,25	24995,50	26907,80	0,76	0,64
B2	4,89	2,86	146384,00	205666,00	0,69	0,65
B3	3,23	3,37	39775,40	45890,00	0,76	0,65
B4	5,81	5,21	49031,90	56171,30	0,74	0,64
C1	3,18	3,10	3925,42	3404,82	0,70	0,71
C2	2,56	2,61	1691,95	2115,42	0,68	0,68
C3	2,59	2,84	2297,56	2673,33	0,69	0,68
C4	3,21	2,97	99394,80	130650,00	0,70	0,69
C5	2,63	2,59	1381,90	1969,83	0,67	0,67
C6	2,62	2,58	998,47	1272,07	0,67	0,67
C-Üst						
Kontaksız	2,54	2,59	3429,79	7005,92	0,70	0,70

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

Kuru toz halinde alınıp 2mg/ml’lik PANI/DMF çözeltisi hazırlanan Aldrich polianilin-530565 (A) örneği ile 4 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız nokta üretildi. Çözelti olarak alınan Aldrich polianilin-650513 (B) örneğinden 4 adet üst kontaklı üretilirken yine çözelti olarak alınan Aldrich polianilin-649996 (C) örneğinden 6 adet üst kontaklı, 1 adet üst kontaklız nokta elde edildi. On dört tanesi üst kontaklı, iki tanesi de üst kontaklız olmak üzere toplam 16 noktadan ölçümler alındı.

A numunesindeki üst kontaklı noktaların I-V karakteristikleri ile bulunan engel yükseklikleri 0.54-0.57 eV aralığında yer alırken, Cheung fonksiyonları ile bulunan engel yükseklikleri 0.55-0.57 eV aralığında değerler aldı. Aynı şekilde B için sırasıyla 0.69-0.76 eV (I-V) ve 0.64-0.65 eV (Cheung) aralıklarında, C için ise sırasıyla 0.67-0.70 eV (I-V) ve 0.67-0.71 eV (Cheung) aralıklarında değerler elde edildi.

Görüldüğü gibi her bir numune için I-V karakteristikleri ve Cheung fonksiyonları ile elde edilen engel yükseklikleri değerleri birbirine oldukça yakın ve tutarlı değerler çıktı. İncelenen parametrelerden en tutarlı sonuçlar veren parametre engel yüksekliği oldu.

A numunesindeki üst kontaklı noktaların I-V karakteristikleri ile bulunan idealite faktörleri 2.14-3.00 eV aralığında yer alırken, Cheung fonksiyonları ile bulunan idealite faktörleri 1.08-2.85 eV aralığında değerler aldı. Benzer şekilde B için sırasıyla 2.83-5.81 eV (I-V) ve 2.86-5.25 eV (Cheung) aralıklarında, C için ise sırasıyla 2.56-3.21 eV (I-V) ve 2.58-3.10 eV (Cheung) aralıklarında değerler bulundu.

Çizelge 5.10’da görüldüğü gibi her bir numune için I-V karakteristikleri ve Cheung fonksiyonları ile elde edilen idealite faktörleri değerleri geniş bir aralıkta çıkmasına rağmen seçilen herhangi bir nokta için bulunan değerler birbirine oldukça yakın ve tutarlı çıktı. Sadece B1 ve B2 noktalarının idealite faktörü değerleri diğerlerine göre daha farklı sonuçlar verdi.

İdealite faktörü değerlerinin 1’den oldukça büyük olması, arayüzey hallerine, organik/inorganik arayüzeyindeki nativ oksit tabakasına atfedilebilir.

A numunesindeki üst kontaklı noktaların $[dV/(d\ln I)]-I$ grafiğinden bulunan seri direnç değerleri 99.44-1139.45 Ω aralığında yer alırken, $H(I)-I$ grafiğinden bulunan seri direnç değerleri 121.12-1221.92 Ω aralığında değerler aldı. Aynı şekilde B için sırasıyla 24995.50-146384 Ω (I-V) ve 26907.80-205666 Ω (Cheung) aralıklarında, C için ise sırasıyla 998.47-99394.80 Ω (I-V) ve 1272.07-130650 Ω (Cheung) aralıklarında değerler elde edildi.

Çizelge 5.10'da görüldüğü gibi her bir numune için farklı Cheung fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerleri çok geniş bir aralıkta çıkarken, seçilen herhangi bir nokta için bulunan değerler arası fark %15-20 civarında oldu.

Seri dirençlerde bu kadar farklı mertebelerde değerler elde edilmesi, PANI film kaplamasının inhomojenliğine atfedildi.

Üst kontaklı noktalara bakıldığında, A numunesinde diğerlerine nazaran, C numunesinde ise C4 nolu nokta hariç diğerlerinden çok daha yüksek bir seri direnç değeri bulundu. Bu durumun, ölçüm almak için kullanılan probe ile PANI arasındaki yüksek direnç ve probun PANI katmanını ezmesinden kaynaklanan kararsız yapılara atfedildi.

Genel olarak en iyi değerler C numunesine ait noktalarda bulundu. Bu da C numunesinde, çözelti içerisindeki PANI parçacık boyutunun 20 nm'nin altında olması ile açıklandı. B numunesinin sonuçları arasındaki farklılıklar çözelti içerisindeki PANI parçacık boyutunun 400 nm'nin üzerinde olmasına atfedildi.

Üretilen 14 adet kontakla ait idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin ortalaması sırasıyla 3.01 ve 0.66 eV olarak hesaplandı. Bu değerler incelendiğinde, literatür kayıtlarıyla (Sağlam ve ark., 2004) uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Seri direnç değerleri ise farklılık arz etmektedir. A, B ve C numuneleri için seri dirençlerin ortalama değerleri sırasıyla 10.2 k Ω , 74.4 k Ω ve 2.4 k Ω olarak hesaplandı. Bunlardan C numunesine ait kontakların seri direnci önceden yapılmış (Sağlam ve ark., 2004) çalışmalardan elde edilen değere nazaran daha düşük değer olmakla birlikte, B numunesine ait kontakların hepsinin direnci çok daha yüksek değerlere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, film kalınlığının yanı sıra parçacık boyutunun çok büyük olmasına atfedildi. A numunesinin kontaklarından çok yüksek dirençli bir kontak hariç diğerlerinin ortalama seri direnci 0.4 k Ω olarak elde edildi. Seri direnç için elde edilen bu değer literatür kayıtlarıyla

karşılaştırıldığında, daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Seri dirençlerin yüksek değerlere sahip olması, takip ettiğimiz kontak üretim tekniğine, film kalınlığına ve organiği oluşturan tanecik boyutlarının büyüklüğüne atfedildi.

KAYNAKLAR

- Abukay, D., Aral, E., Işın, A., Kılınçkaya, M.S., Önengüt, G., Özel, M.E., Ülkü, D., Veziroğlu, N., Zor, M., Yörükoğulları, E., Şenyel M., 1991. **Modern Fizik**. Anadolu Üniversitesi, Etam A.Ş. Web-Ofset tesisleri. Eskişehir. 123-124, 128, 133.
- Ashok, S., Borrego, J.M. and Gutmann, R.J., 1979. Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. **Solid State Electronics**, **22**: 621-631.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Türüt, A., 2005. On the barrier inhomogeneities of polyaniline/p-Si/Al structure at low temperature. **Applied Surface Science**, **250**: 43-49.
- Bantikassegn, W., Ingnas, O., J. 1996. The electrical properties of junctions between aluminum and doped polypyrrole. **Phys. D: Appl. Phys.**, **29**: 2971.
- Bardeen, J., 1947. Surface states and rectification at a metal to semiconductor contact. **J. Phys. Rev.(A)**, **71**: 717-727.
- Barker, P.S., Monkman, A.P., Petty, M.C., Pride, R., 1997. Electrical characteristics of a polyaniline/silicon hybrid field-effect transistor gas sensor. **IEE Proc. Circuits Devices Syst.**, **144**: 111-116.
- Bethe, H.A., 1942. Theory of the boundary layer of crystal rectifiers. **MIT Radiztion Laboratory Report**, 43: 12.
- Bethe, H.A., 1981. **Theory of The Boundary Layer of Crystal Rectifiers**. Mass. Ins. Techno., Radia Lab Reba.(1942): 43-12.
- Braun, F., 1874. Über die stromleitung durch schwefel metalle. **Anal. Phys. und Chem.**, **153** (4): 556-563.
- Campos, M., Braz-Bello Jr, 1993. Photovoltaic effect in polymer-semiconductor heterojunction. **J. Phys. D. Appl. Phys.**, **26**: 1274.
- Chen, M., Nillson, D., Kugler, T., Berggren, M., 2002. Bi-stable and dynamic current modulation in electrochemical organic transistors. **Appl. Phys. Lett.**, **81**: 2011-13.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. **Appl. Phys. Let.**, **49** (2): 85-90.

- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965. Electron optical phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal semiconductor structures. ***Solid State Electronics***, **8** (12): 979-990.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966. Current transport in metal-semiconductor barriers. ***Solid State Electron***, **9**: 1035.
- Dündar, T., 2007. ***Ag/GaAs Schottky Yapıların I-V ve C-V Karakterizasyonu***. (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya. 22.
- Fritts, C.E., 1983. New form of selenium cell. ***Amer. Science***, **26**: 465-472.
- Glenis, S., Tourillon, G., Garnier, F., 1986. Influence of the doping on the photovoltaic properties of thin films of poly-3-methylthiophene. ***Thin Solid Films***, **139**: 221.
- Grondahl, L.O., Geiger, P.H., 1927. A new electronic rectifier. ***Trans. AIEE.***, **46**: 357-366.
- Gupta, R., Misra, S.C.K., Malhotra, B.D., Beladakere, N.N., Chandra, S., 1991. Metal/semiconductive polymer Schottky device. ***Appl. Phys. Lett.***, **58**: 51-53.
- Hemangi, K., Choudhari, D.S., Kelkar, 1996. Properties of metal-polyaniline schottky barriers. ***J. Appl. Polym. Sci.***, **61**: 561-565.
- Henisch, H.K., 1957. ***Rectifying Semiconductor Contacts***. Oxford at the Clarendon Pres., Oxford. 255-256.
- Huang, L.-M., Wen, T.-C., Gopalan, A., Ren, F., 2003. Structural Influence on The Electronic Properties of Methoxy Substituted Polyaniline/Aluminum Schottky Barrier Diodes. ***Materials Science and Engineering B.***, **104**: 88-95.
- Lacroix, J.C., Diaz, A.F., 1988. Electrolyte effects on the switching reaction of polyaniline ***J. Electrochem. Soc.***, **135**: 1457-1463.
- Li, C., Wang, Y., Wan, M., Li, S., 1990. Rectifying effect of soluble polyaniline films. ***Synth. Met.***, **39**: 91.
- MacDiarmid, A.G., Chiang, J.C., Halpern, M., Tuang, W.S., Liu, S.L., Somasiri, N.L.D., Wu, W.Q., Yaniger, S.I., 1981. "Polyaniline": Interconversion of metallic and insulating forms. ***Mol. Cryst. Liq. Cryst.***, **121**:173-180.
- McEachron, K.B., 1930. Thyrite, a new material for lightening arrestors. ***General Electric Review***, **23**: 92.
- Misra, S.C.K., Ram, M.K., Pandey, S.S., Malhotra, B.D., Chandra S., 1992.

- Vacuum-deposited metal polyaniline Schottky devices. *Appl. Phys. Lett.*, **61**: 1219-1221.
- Mott, N.F., 1939. The theory of crystal rectifiers. *Proc. Roy. Soc.*, **CLXXI**: 27-38.
- Mutlu, T., 2010. *Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs Yapılı p-n Eklem Diyotun Tavlama Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu*. (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir. 7-13.
- Nafdey, R.A., Kelkar, D.S., 2005. Schottky diode using FeCl₃-doped polyaniline. *Thin Solid Films*, **477**: 95-99.
- Neamen, D., 2009. http://www.physics.mun.ca/~p3000/lectures/Lecture_18.pdf. Memorial University. Canada. Erişim tarihi: 16.06.2010.
- Özdemir, A.F., 2000. *Metal/n-tipi GaAs Schottky Diyotlarında Havada Oksitlenme ve Yaşlanmanın Akım-Gerilim (I-V) ve Kapasite, Kondüktans-Gerilim, Frekans (C,G-V,f) Karakteristiklerine Etkisi*. (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta. 9-11,13-14.
- Pandey, S.S., Misra, K.C.S., Malhotra, D.B., Chandra, S., 1992. Some recent studies on metal polyaniline schottky devices. *J. Appl. Polym. Sci.*, **44**: 911-915.
- Pearson, G.L., Brattain, W.H., 1955. *History of Semiconductor Research*. Proc. IRE, **43**: 1794, 1795.
- Pierce, G.W., 1907. Crystal rect. for electrical oscillators. *Phys. Rev.*, **25**: 31-60.
- Sağlam, M., Ateş, A., 2007. *Yarıiletken Fizikine Giriş (Donald A. Neamen)*. **3**:141,182,207
- Sağlam, M., Biber, M., Çakar, M., Türüt, M., 2004. P The effects of the ageing on the characteristic Parameters of polyaniline/p-type Si/Al structure. *Applied Surface Science*, **230**: 404-410.
- Scaff, J.H., Theuerer, H.C., Schumacher, E.E., 1949. P-type and n-type silicon and the formation of the photovoltaic barrier in silicon ingots. *Trans. Amer. Ins. of Mining & Metallurg. Eng.*, **185**: 383-388.
- Schottky, W., 1938. Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, **26**: 843.
- Schottky, W., Spenke, E., 1939. *Wiss Veröff Siemens-Werken*. **18**: 225
- Sharma S.K., Misra, S.C.K., 2002. Optimization of conducting polymer thin film

- optical and electrical waveguides. *Int. J. for Light and Electron Optics*, 113 (8): 351-353.
- Smith, W., 1873. The Action of light on selenium. *J. Soc. Telegraph Engineers*, 2 (1): 31-33.
- Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductors Devices*. John-Wiley and Sons, New York.
- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu*. (Doktora Tezi). Atatürk Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 7-8.
- Temirci C., Gülcan M., Goksen K., Sönmez M., 2010. Ohmic and rectifier properties of Al/Ligand(N-APTH) and Al/Cu(II) complex contacts. *Microelectronic Engineering*, 87: 2282–2287.
- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu*. (Doktora Tezi). Atatürk Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 10-11.
- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu*. (Doktora Tezi). Atatürk Ün., Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 18.
- Temirci, C., 2011. Sözlü görüşme. Yüzüncü Yıl Üniv. Fen F. Fizik Böl.
- Torrey, H.C., Whitmer, C.A., 1948. *Crystal Rectifiers*. New York. 9.
- Tsukamoto, J., Ohigashi, H., Matsumura, K., Takahushi, A., 1982. Characteristics of Schottky barrier solar cells using polyacetylene, (CH)_x. *Synth. Met.*, 4: 177.
- Tsukamoto, J., Ohigashi, H., 1982. Electrical characteristics of W/P3MT/Pt diodes. *Synth. Met.*, 4: 177.
- Uehara, K., Takagishi, K., Yamano, S., Ttanaka, M., 1988. Fabrication and optoelectrical properties of polypyrrole-rhodamine B two-layer organic photovoltaic cell. *J. Polym. Sci., Part C, Polym. Lett. Ed.*, 26: 95-98.
- Wilson, A.H., 1931. The theory of electronic semiconductors, *Proc. Roy. Soc.*, A133:458-491.
- Xie, D., Jiang, Y., Pan, W., Li, D., Wu, Z., Li, Y., 2002. Fabrication and characterization of polyaniline-based gas sensor by ultra-thin film technology. *Sens. Actuators B. Chem.*, 81: 158–164.

- Yang, C.H., 1999. Schottky barriers derived from metal-modified polyaniline. **J. Electrochem. Soc.**, **146**: 1939-1945.
- Ziel, A.V., 1968. **Solid State Physical Electronics**. Prentice Hall, Inc., New Jersey. 245.
- Ziel, A.V., 1976. **Solid State Physical Electronics**. Prentice Hall, Inc., New Jersey. 61.

ÖZ GEÇMİŞ

1975 yılında Siirt'te doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Van'da tamamladı. Boğaziçi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü'nden 1998 yılında mezun oldu. 1998 -2009 yılları arasında Fizik Öğretmenliği yaptı. Nisan 2009'dan beri Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve 2 çocuk babasıdır.