

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs YAPILI P-N EKLEM DİYOTUN
TAVLANMA SICAKLIKLARINA GÖRE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe MUTLU

Balıkesir, Temmuz - 2010

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs YAPILI P-N EKLEM DİYOTUN
TAVLANMA SICAKLIKLARINA GÖRE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe MUTLU

Balıkesir, Temmuz - 2010

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs YAPILI P-N EKLEM DİYOTUN
TAVLANMA SICAKLIKLARINA GÖRE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe MUTLU

Tez Danışmanı: Prof Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK

Sınav Tarihi: 20. 07. 2010

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Ali TEKE (BAÜ)



Doç. Dr. Halil GÜLER (BAÜ)



Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK (Danışman-BAÜ)



Enstitü Yönetim Kurulunun tarih sayılı oturumunun
nolu kararı ile Mezun olmuştur.

Balıkesir, Temmuz - 2010

**Bu yüksek lisans çalışması Balıkesir Üniversitesi 2009/07 Nolu Araştırma
Projesi ile Desteklenmiştir. Teşekkür Ederiz.**

ÖZET

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs YAPILI P-N EKLEM DİYOTUN TAVLANMA SICAKLIKLARINA GÖRE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Tuğçe MUTLU

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Fizik Anabilim Dalı**

(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı:

Prof Dr. Süleyman ÖZÇELİK (Gazi Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. Orhan Zeybek (Balıkesir Üniversitesi))

Balıkesir, Temmuz 2010

Bu çalışmada p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısı, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) sisteminde büyütüldü. Bu yapının üzerine omik altın (Au) kontaklar yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminde alındı. İletken teller gümüş pasta yardımı ile Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısına tutturuldu böylece yapı elektriksel ölçümleri almak için hazır hale geldi. Yapının elektriksel karakteristikleri I-V deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. Deneysel ölçümlerden elde edilen akım-gerilim (I-V) değerlerinden I-V grafikleri çizildi. I-V grafiklerinden doyum akımı, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerleri belirlendi. Diyot yapısı ilk önce 450°C’de daha sonra 500°C sıcaklıklarda tavlandı. Tavlama işleminden sonra yapının I-V grafiğinden doyum akımı, idealite faktörü ve bariyer yüksekliğindeki değişimler incelendi. Tavlama sonunda, metal kontak-yarıiletken arasındaki engel yüksekliğinin düştüğü ve doyum akımının arttığı gözlemlendi. İdealite faktörünün eklem bölgesinde azaldığı ve omik kontak bölgesinde ise arttığı bulundu. Sonuç olarak, tavlama sonucunda diyot özelliğinin iyileştiği belirlendi.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: p-n Eklem Diyotu/ Isıl Tavlama/ I-V karakteristiği

ABSTRACT

AN ELECTRICAL CHARACTERISATION OF THE ANNEALED P-N JUNCTION DIODE Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs

Tuğçe MUTLU

Balıkesir University, Institute of Science, Department of Physics

(Ms. Thesis / Supervisor:

Prof. Dr. Süleyman Özçelik (Gazi University)

Yrd. Dr. Orhan ZEYBEK (Balıkesir University))

Balıkesir, 2010

In this study, p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs structure was grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE) system. Ohmic gold (Au) contacts were taken on the p-n junction diode in high vacuum thermal evaporation system. Using silver paste, the conductor wires were attached to Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs so that the structure was ready for the electrical measurements. Electrical characteristics of the structure were determined using I-V experimental methods. The I-V graphics were drawn using I-V data. Barrier height, an idealite factor and saturation current were determined using I-V graphics. The diode junction was annealed at temperature of 450°C and then it was annealed at temperature of 500°C. The changes of barrier height, idealite factor and saturation current were studied after annealing. It is observed that the barrier height decreased, while saturation current increased. It is also found that the idealite factor decreased in junction region although it was increased in ohmic contact region. In conclusion, the characteristic of diode was improved after annealing.

KEY WORDS: p-n junction diode / Thermal Annealing / I-V characteristic

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT, KEY WORDS	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKENLER	3
2.1 Giriş	3
2.2 Yarıiletken Malzemeler	4
2.2.1 Elementsel Yarıiletkenler	4
2.2.2 Bileşik Yarıiletkenler	4
2.3 Bant Yapısı	6
2.4 Yarıiletken Tipleri	9
2.4.1 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler	9
2.4.2 Katkılı Yarıiletkenler	10
2.4.2.1 p-tipi Yarıiletkenler	11
2.4.2.2 n-tipi Yarıiletkenler	12

2.5 Elektriksel İletkenlik	13
2.6 Difüzyon Akımı	16
3. P-N EKLEM	19
3.1 Giriş	19
3.2 p-n Eklem Temel Yapısı	20
3.3 p-n Eklemde Kontak Potansiyeli	21
3.4 p-n Eklem Elektrik Alan	24
3.5 Eklem Bölgesinin Genişliği	25
3.6 Eklem Kapasitansı	26
3.7 p-n Eklem Diyot	28
3.8 p-n Eklem Diyotun I-V Karakteristikleri	28
3.9 p-n Eklem Diyot Direnci	32
3.10 Omik kontak	33
4. DENEYSEL YÖNTEMLER	35
4.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE)	35
4.2 Materyal Büyütme Süreci	37
4.3 Hızlı Termal Tavlanma (RTA)	38
4.4 Kristal Temizleme	39
4.5 Omik Kontakın Oluşturulması	41
4.6 Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği	44
5. DENEYSEL SONUÇLAR	46
5.1 Giriş	46
5.2 I-V eğrilerinin karakteristiği	46
5.3 Analiz Sonuçları	48
5.3.1 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n Eklem Diyota I. Bölge Analizi	51
5.3.2 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n Eklem Diyota II. Bölge Analizi	54
5.4 R_s(Ω)-V(V) Eğrilerinin Karakteristiği	56
6. SONUÇLAR	59
7. KAYNAKLAR	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E_g	yasak enerji aralığı
E_V	valans bandı
E_C	iletim bandı
n	birim hacimdeki elektron sayısı
p	birim hacimdeki deşik sayısı
n_i	saf taşıyıcı yoğunluğu
p_p	çoğunluk taşıyıcılar deşikler
n_p	azınlık taşıyıcılar elektronlar
E_A	alıcı (akseptör) enerji düzeyler
n_n	çoğunluk taşıyıcılar elektronlar
p_n	azınlık taşıyıcılar deşikler
E_D	verici (donör) enerji düzeyi
μ	mobilité
μ_e	elektronların mobilitesi
μ_h	deşiklerin mobilitesi
τ_e	elektronların yarılanma süreleri
m_e^*	elektronun etkin kütlesi
τ_h	deşiklerin yarılanma süreleri

m_h^*	deşiklerin etkin kütleli
σ	elektriksel iletkenlik
ρ	elektriksel özdirenç
D_h	deşiklerin difüzyon katsayı
D_e	elektronların difüzyon katsayı
V_{bi}	dahili potansiyel
Φ_{Fn}	n-tipi tarafta oluşan potansiyel
Φ_{Fp}	p-tipi tarafta oluşan potansiyel
N_a	alıcı (akseptör) katkı yoğunluğu
E_{Fi}	Fermi enerjisi
k	Boltzmann sabiti
T	mutlak sıcaklık
N_d	verici (donör) katkı konsantrasyonu
$\Phi(x)$	elektrostatik potansiyel
ϵ_s	yarıiletkenin dielektrik sabiti
$E(x)$	elektrik alan
x_p	p-tipi bölgedeki eklem bölgesinin genişliği
x_n	n-tipi bölgedeki eklem bölgesinin genişliği
W	eklem bölgesinin genişliği
C	eklem kapasitansı
A	diyodun alanı
I_0	doyum akımı
V_D	diyod üzerine düşen gerilim
n	idealite faktörü
J	akım yoğunluğu
R_C	kontak direnci
$\Phi_B(I-V)$	potansiyel engel yüksekliği

A[*]	etkin Richardson sabiti
R_s	seri direnç
R_{sort}	ortalama seri direnç

Kısaltmalar

Açıklama

LED	Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
MBE	Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy)
UHV	Ultra Yüksek Vakum (Ultra High Vacuum)
RHEED	Yüksek Enerjili Elektronların Kırınım Yansıması (Reflection High-Enerji Electron Diffraction)
AES	Auger Elektron Spektroskopisi (Auger Elektron Spectroscopy)
I-V	Akım-Gerilim (Current-Potential)
TN	Tavlanmamış numune

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 2.1	(a) iletkenler (b) yarıiletkenler (c) yalıtkanların bant yapıları	7
Şekil 2.2	Yarıiletkenlerde elektron-deşiklerin çifti oluşumu	8
Şekil 2.3	Katkısız (saf) yarıiletken oluşumu	10
Şekil 2.4	p-tipi katkılı yarıiletken oluşumu	11
Şekil 2.5	p-tipi yarıiletkenin bant yapısı	12
Şekil 2.6	n-tipi katkılı yarıiletken oluşumu	12
Şekil 2.7	n-tipi yarıiletkenin bant yapısı	13
Şekil 2.8	Elektrik alan altında yarıiletkendeki elektron ve deşiklerin hareketi	14
Şekil 3.1	p-n eklem oluşumu	20
Şekil 3.2	p-n eklem oluşmadan önceki p-tipi ve n -tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı	21
Şekil 3.3	Denge durumundaki p-n eklem enerji-bant diyagramı	22

Şekil 3.4	Bir p-n eklemının eklem bölgesi içindeki uzay yük yoğunluğu ve elektrik alan değışimi	25
Şekil 3.5	p-n eklem diyotta uygulanan gerilimin etkileri; (a) denge durumu, (b) ileri besleme durumu ve (c) ters besleme durumu için enerji bant diyagramları	29
Şekil 3.6	İdeal p-n eklem diyotun I-V grafiği	31
Şekil 3.7	Ters besleme durumunda p-n eklemın zener ve çığ tipi kırılmaları	32
Şekil 4.1	VG80H MBE modeli	35
Şekil 4.2	p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs p-n eklem yapısının şematik gösterimi	37
Şekil 4.3	Hızlı Termal Tavlama Sistemi	38
Şekil 4.4	Yüksek Vakum Termal Buharlaştırma Sistemi	41
Şekil 4.5	Omik kontak oluşturulmasında kullanılan yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi	42
Şekil 4.6	Arka omik kontak oluşturulurken kullanılan maske	42
Şekil 4.7	Üst noktasal kontakların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maske	43
Şekil 4.8	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapısının şematik gösterimi	44
Şekil 4.9	Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi	45

Şekil 4.10	Akım-gerilim (I-V) ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği	45
Şekil 5.1	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs p-n eklem diyotun oda sıcaklıklarında alınan yarı-logaritmik I-V grafiği	49
Şekil 5.2	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs p-n eklem diyotun oda sıcaklığında alınan (a) yapının tavlانmadan önceki $\ln I - V$ eğrileri (b) 450°C de tavlانmış yapının $\ln I - V$ eğrileri (c) 500°C de tavlانmış yapının $\ln I - V$ eğrileri	50
Şekil 5.3	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlانma sıcaklıklarına göre doyum akımındaki değişimler	51
Şekil 5.4	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlانma sıcaklıklarına göre idealite faktöründeki değişimler	52
Şekil 5.5	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlانma sıcaklıklarına göre bariyer yüksekliklerindeki değişimler	53
Şekil 5.6	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlانma sıcaklıklarına göre doyum akımındaki değişimler	54
Şekil 5.7	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlانma sıcaklıklarına göre idealite faktöründeki değişimler	55

Şekil 5.8	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre bariyer yüksekliklerindeki değişimler	55
Şekil 5.9	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklığından önceki, 450°C’de ve 500°C’de tavlama sıcaklığının R _s (Ω)-V(V) grafiği	57
Şekil 5.10	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre seri dirençlerin ortalaması	57

TABLO LİSTESİ

Tablo	<u>Adı</u>	<u>Sayfa No.</u>
Tablo 2.1	Periyodik cetvelin yarıiletkenler ile ilgili bölümü	4
Tablo 2.2	Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler	6
Tablo 2.3	Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları (E_g)	8
Tablo 5.1	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapısının tavlama sıcaklıklarına göre I_0 , n ve Φ_b	53
Tablo 5.2	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapısının tavlama sıcaklıklarına göre I_0 , n ve Φ_b	56
Tablo 5.3	Au/p-GaAs _{1-x} P _x /n-GaAs yapısının ortalama seri dirençleri	58

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yapılan ölçümleri almamda ve değerlendirmede bana her zaman yardımcı olan ve maddi ve manevi desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana yardımcı olan ve bilimsel bilgileri ile beni aydınlatan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK'e teşekkür ederim.

Yüksek vakum termal buharlaştırma sistemini ve hızlı tavlama işlemini öğreten Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV'a, I-V ölçümlerini almamda ve değerlendirmemde yardımcı olan Tarık ASAR ve Umut Aydemir'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını yürüttüğüm Gazi Üniversitesi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı'nın kurulmasına 2001K120590 nolu proje ile destek sağlayan DPT'ye teşekkür ederim.

Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri birimine 2009/07 nolu yüksek lisans projesine desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmamda benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

Balıkesir - Temmuz 2010

Tuğçe MUTLU

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler 1940 yılının sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Bu tarihten sonra günümüze kadar yarıiletken malzemeler üzerinde birçok çalışma yapılmış ve buna paralel olarak yarıiletken teknolojisinde büyük gelişmeler olmuştur.

Yarıiletkenler; iletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alan malzemelerdir [1]. Yarıiletkende iletim, genellikle safsızlık atomlarına, sıcaklığa, ışığa, ısıya ve manyetik alana bağlıdır [2]. İletimdeki bu duyarlılık yarıiletken malzemeleri elektronik uygulamalar için önemli hale getirir [2].

Bugün elektronik devre elemanların hemen hemen hepsinde yarıiletken malzeme kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemelerin, küçük boyutlu, uzun ömürlü ve verimli olmalarından dolayı elektronik devre elemanlarında kullanılmaları tercih edilir.

Yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik devre elemanlarında kullanılması, katıhal fiziğinin 20.yüzyıl teknolojisine önemli bir katkı sağlamıştır [3]. Bugün kullanılan birçok yarıiletken cihazların işleyişi, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler arasındaki eklemlerin doğası üzerine kuruludur. Yapısında yarıiletken malzeme kullanılan elektronik devre elemanlarına fotovoltatik pil, dedektör, diyot ve transistör örnek verilebilir.

Elektronik aygıtlar, yarıiletken-yarıiletken, metal-yarıiletken ya da metal-metal arasında oluşan eklemleri içerirler. Bu çalışmada yarıiletken-yarıiletken arasında meydana gelen p-n eklemler üzerinde duruldu. p-n eklem, p ve n-tipi yarıiletkenler aynı kristal içerisinde oluşturulmasıdır. p-n ekleme dışarıdan gerilim uygulandığı zaman p-n eklem ileri besleme altında üzerinden büyük bir akımın akmasına izin verirken, ters besleme durumunda küçük bir akımın akmasına izin verir. Bu özelliğinden dolayı p-n eklem yarıiletken diyot görevi görür. p-n eklem

elektronik devrelerde alternatif akımı doğru akıma çevirmesi veya bir sinyalin yükseltmesi gibi özellikleri vardır. Ayrıca p-n eklemler; ışık yayan diyot (LED), fotovoltaik hücre ve fotodiyot aygıtlarının temelini oluşturlar.

Yarıiletken-yarıiletken, metal-yarıiletken ya da metal-metal arasında oluşan eklemlere kontak alınması ile eklemlerin elektriksel özellikleri incelenir. İki malzemenin en küçük dirençli metaller ile (direncin idealde sıfır olması beklenir) birbirine temas etmesi işlemine “kontakt” denir. Kontakt yapımında kullanılan malzeme yüzeylerinin temiz, pürüzsüz, parlak ve oksitsiz olması ideal bir kontakt için oldukça önemlidir. Doğru ve ters besleme durumlarında akımın iletilmesini sağlayan kontaktların “omik ” olması gerekir. Bu çalışmada elektriksel ölçümlerin alınabilmesi için yapının arka yüzeyine uygun maske yerleştirilerek omik kontakt, epitaksiyel yüzeyinde uygun maske yerleştirilerek noktasal omik kontaktlar alındı. Bu kontaktların alınması için yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanıldı.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde yarıiletkenlerin temel özellikleri, yarıiletken malzemeler, katıların bant yapıları, yarıiletken tipleri, elektriksel iletkenlik ve difüzyon akımı hakkında bilgi verildi. Üçüncü bölümünde p-n eklemler ile ilgili temel ve elektriksel özellikleri hakkında genel bilgi verildi. Dördüncü bölümde Gazi Üniversitesi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarında (STARLAB) bulunan ve bu çalışmada kullanılan Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Hızlı Termal Tavlama, yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi ve I-V deneysel ölçüm düzeneği hakkında bilgi verildi. Ayrıca Au/GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyotunun hazırlanmasında yapılan işlemler anlatıldı. Beşinci bölümde ise yapılan ölçümlerden elde edilen deneysel sonuçlar verildi. Altıncı bölümde ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar sunuldu.

2. YARIİLETKENLER

2.1 Giriş

İletkenlik bakımından iletkenler ile yalıtkanlar arasında yer alan yarıiletkenler malzemeler, mutlak sıcaklıkta ($T=0K$) yalıtkanların özelliklerini gösterirler. Ancak yarıiletken malzemeler; ışık, ısı ya da manyetik alan altında bırakıldığında veya gerilim uygulandığında valans bandında bulunan elektronların bir kısmı yasak enerji aralığını geçerek iletim bandına çıkarlar. İletim bandına çıkan elektronlar ilettime katılacağından yarıiletken iletkenlik özelliği kazanır. Ancak yarıiletken malzemelerde iletkenlik geçici olup bu dış etkiler kaldırıldığında yarıiletken yine yalıtkan hale geçer. Yarıiletkenler bu özelliklerinden dolayı elektronik teknolojide oldukça yoğun olarak kullanılır. Yarıiletkenler kristal yapıya sahiptir yani atomları düzenli bir şekilde sıralanmıştır.

Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlikleri aşağıda verilen şu özelliklere göre değişir [4]:

1-) Saf (katkısız) yarıiletkenlerde iletkenlik, malzemenin sıcaklığı artıkça artar.

2-) Saf olmayan (katkılı) yarıiletkenlerde iletkenlik safsızlık konsantrasyonuna bağlıdır.

3-) Yarıiletkenlerin iletkenliğini etkileyen diğer bir faktör de yük taşıyıcılarıdır. Yarıiletkenlerde yük taşınması, elektron veya deşikler tarafından gerçekleştirilir.

2.2 Yarıiletken Malzemeler

19. yüzyılın başlarında yarıiletken malzemeler ile ilgili çalışmalar başlamıştır ve bu yıllarda birçok yarıiletken malzeme keşfedilmiştir [2]. Periyodik cetvelin yarıiletkenler ile ilgili kısmı Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Periyodik cetvelin yarıiletkenler ile ilgili bölümü [2]

Periyot	II.Sütun	III.Sütun	IV.Sütun	V.Sütun	VI.Sütun
2		B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg		Pb		

Yarıiletkenler tabiatta doğal halde bulunduğu gibi laboratuvar ortamında bileşim şeklinde elde edileceğinden dolayı yarıiletken malzemeler elementel, bileşik ve alaşım yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır:

2.2.1 Elementel Yarıiletkenler

Aynı atomlardan oluşan yarıiletkenler olup atomları birbirine kovalent bağlar ile bağlar. Tablo 2.1 de verilen periyodik cetveldeki Si ve Ge elementel yarıiletkenlere birer örnektir. Bu iki yarıiletkene “doğal yarıiletken” de denmektedir.

2.2.2 Bileşik ve Alaşım Yarıiletkenler

Bileşik yarıiletkenler, iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmanın bir kombinasyonudur. Bileşimli yarıiletkenler, ikili, üçlü,

dörtlü yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır. İki'den fazla elementin birleşmesiyle oluşan yarıiletkenler “alaşım yarıiletken” olarak sınıflandırılır.

Bileşik yarıiletkenler: Kimyasal formülü AB olan yarıiletken bileşiklerdir. Eğer A elementine üç valans elektronu ve B elementine de beş valans elektronu bağlı ise bu ikili bileşik yarıiletken grubuna “III-V grubu yarıiletkenler” denir. GaAs, InP ve GaP örnek olarak verilebilir.

Üçlü bileşimli yarıiletkenler (alaşım yarıiletkenler): İkili bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesi ile oluşur. $GaAs_xP_{1-x}$ örnek olarak verilebilir.

Dörtlü bileşimli yarıiletkenler (alaşım yarıiletkenler): Bu tipteki yarıiletkenler birçok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşiminden elde edilir. $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ örnek olarak verilebilir.

Son zamanlarda yarıiletken bileşimler çeşitli elektronik ve optoelektronik aygıtlarda kullanılmaya başlanmıştır [2]. Bu aygıtlarda en çok kullanılan elementsel ve bileşim yarıiletkenlere örnekler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler

Genel Sınıflandırma	Yarıiletkenler	
	Sembol	İsim
Element	Si	Silisyum
	Ge	Germanyum
İkili Bileşikler		
IV-VI	SiC	Silisyum karbit
III-V	AlAs	Alüminyum arsenit
	GaN	Galyum nitrat
	GaP	Galyum fosfat
II-VI	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
IV-VI	PbS	Kurşun sülfür
	PbTe	Kurşun tellür
Üçlü Bileşim	$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
	$GaAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat
Dörtlü Bileşim	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Galyum indiyum arsenik fosfat
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

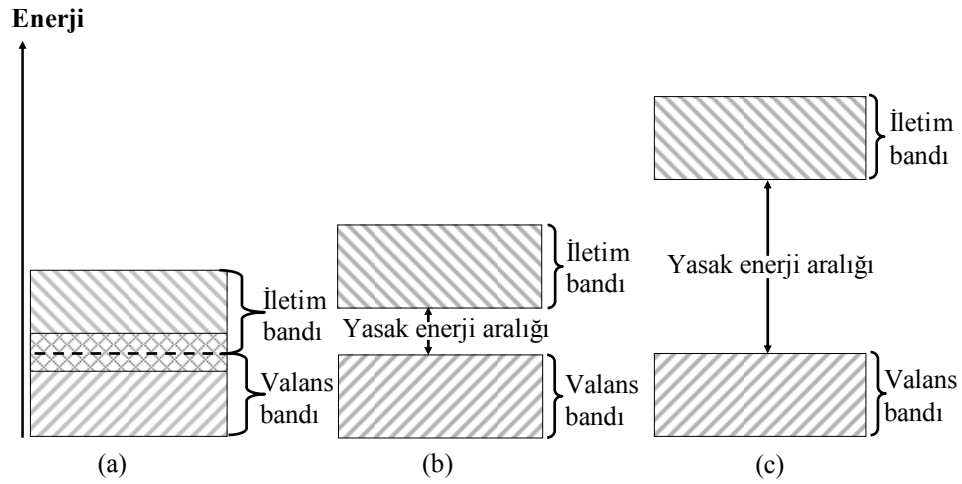
2.3 Bant Yapısı

Doğada bulunan katıların birçoğu kristal yapıya sahiptir. Kristal yapı, katı içinde iyon ve moleküllerin üç boyutlu ve periyodik dizilişidir yani katı içinde atom veya atom grupları düzenli bir şekilde bulunmaktadır. [5]. Kristal yapı içerisinde atomlar bir araya geldiği zaman atom içindeki elektronların enerji seviyeleri birbirinden etkilenir.

Kristal yapının biçimine bağlı olarak atomlar birbirine daha da yakın olduğunda valans kabukları iç içe geçecek ve valans elektronlarının enerji seviyeleri Pauli dışarlama ilkesine göre farklı değerler alır. Valans elektronlarının enerji seviyelerindeki farklılaşmalarından dolayı kristal yapıya bağlı olarak enerji bandı, valans bandı ve iletim bandı olarak ikiye ayrılır [6].

Valans bandı ile iletim bandı arasında elektronların bulunamayacağı enerji seviyelerini içeren bant aralığı oluşur ve bu oluşan enerji band aralığına “yasak enerji aralığı” denir ve E_g ile ifade edilir. Valans bant; yasak enerji aralığının altında kalan, bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesidir ve E_V ile ifade edilir. İletim bandı ise yasak enerji aralığının üstünde kalan ve serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesidir ve E_C ile ifade edilir.

Bir katı malzeme bant yapısına göre iletken (metal), yarıiletken veya yalıtkan olarak üç gruba ayrılır. Şekil 2.1’de iletkenlerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların bant yapıları verilmiştir.



Şekil 2.1 (a) İletkenlerin (b) Yarıiletkenlerin (c) Yalıtkanların bant yapıları

İletkenlerin (metallerin), valans bandı enerji seviyesi ile iletim bandı enerji seviyesi Şekil 2.1(a)’dan görüldüğü gibi iç içe geçmiş şekildedir. Bu malzemelere dışarıdan küçük bir enerji verildiği zaman valans bandındaki elektronların birçoğu iletim bandına geçer. Bundan dolayı iletkenler elektrik akımını kolaylıkla iletirler.

Yarıiletkenlerin valans bandı ile iletim bandı arasında Şekil 2.1(b)’de görüldüğü gibi yaklaşık 1eV’luk bir yasak enerji aralığı vardır [7]. Tablo 2.3’de bazı yarıiletkenlerin 0K ve 300K sıcaklıklarındaki yasak enerji aralıkları verilmiştir.

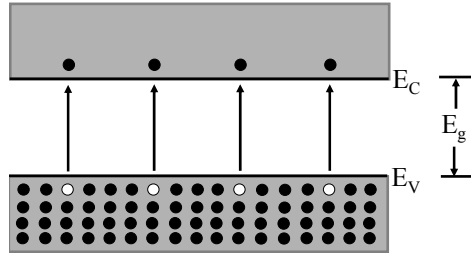
Tablodan da görüldüğü gibi yarıiletken malzemede sıcaklık artıkça yasak enerji aralığı küçülmektedir.

Tablo 2.3 Bazı yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları (E_g)

Kristal	Yasak Enerji Aralığı	
	0K	300K
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

Yarıiletken malzemelerin mutlak sıcaklıkta ($T=0K$ 'de) elektronlarının hepsi valans bandındadır ve yarıiletken malzeme bu durumda yalıtkan özelliği gösterir. Ancak valans bandında bulunan elektronlara yasak enerji aralığının enerjisi kadar dışarıdan bir enerji verilirse elektronların birçoğu iletim bandına geçer. Bu durumda yarıiletken iletken hale geçer.

Yarıiletken malzemede valans bandından iletkenlik bandına elektronlar geçtiğinde, valans bandında boşluk oluşur ve oluşan bu boşluğa “deşik” denir [8]. Bu durumda yarıiletken malzemelerde Şekil 2.2’de görüldüğü gibi elektron–deşik çiftleri meydana gelir.



Şekil 2.2 Yarıiletkenlerde elektron–deşik çifti oluşumu

Yalıtkanlarda valans bandı ile iletkenlik bandı arasında Şekil 2.1(c)'de görüldüğü gibi yaklaşık 10 eV'luk yasak enerji aralığı vardır [7]. Bu durumda yalıtkanlarda valans bandındaki elektronları iletim bandına geçirmek çok zordur. Bunun için yalıtkanlar elektrik akımını iletmezler.

2.4 Yarıiletken Tipleri

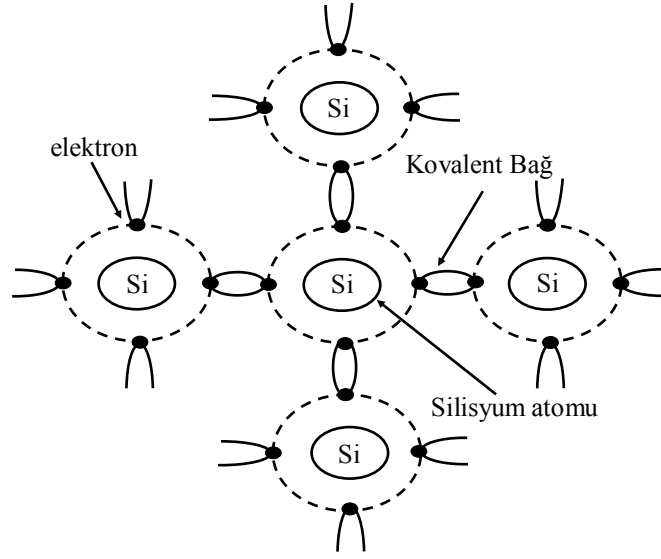
2.4.1 Katkısız (Saf) Yarıiletkenler

Hiçbir kirlilik ve kristal kusur içermeyen mükemmel bir yarıiletken kristal “katkısız (saf) yarıiletkenler” olarak adlandırılır [9]. Katkısız yarıiletken bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur, ancak sıcaklık arttıkça yarıiletken malzemelerde elektron-deşik çiftleri oluşur [10]. Bu durumda taşıyıcılar çift olarak üretildikleri için iletkenlik bandının birim hacmindeki elektron sayısı (n) ile valans bandının birim hacmindeki deşik sayısı (p) birbirine eşittir ve

$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki n_i saf taşıyıcı yoğunluğu olup, yarıiletken malzemenin cinsine ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir [6].

Silisyum (Si) atomları normal şartlar da Şekil 2.3'de görüldüğü gibi son yörüngede ki elektronları ortak kullanarak kovalent bağ oluştururlar. Bu şekilde oluşan kristal yapılar katkısız (saf) yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.3 Katkısız (saf) yarıiletken oluşumu

2.4.2 Katkılı Yarıiletkenler

Bir yarıiletken malzemenin yük taşıyıcılarının sayısı uygun safsızlık atomlarının katkılanması ile artırılabilir [10]. Bu şekilde elde edilen yarıiletken malzemelere “katkılı yarıiletken” denir.

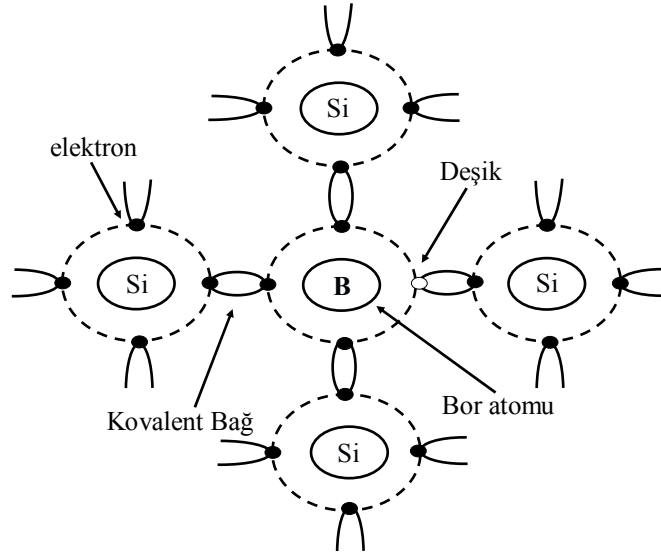
Yarıiletken malzeme alıcı (akseptör) atomları ile katkılı olduğu zaman p-tipi yarıiletken, verici (donör) atomları ile katkılı olduğu zaman ise n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır.

Yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirmek için, kristali oluşturan atomlardan bir kısmının yerine farklı ancak uygun atomların yerleştirilmesi işlemine “katkılama” adı verilir [11].

Katkılama işlemi, değişik yöntemler ile yarıiletken malzemenin kristal yapısını bozmadan gerçekleştirilir [6]. Katkılama oranı arzu edilen özelliğe ve kullanım yerine göre değiştirilebilir.

2.4.2.1 p-tipi Yarıiletkenler

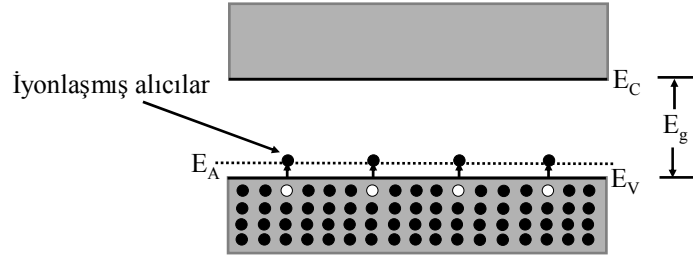
Saf bir yarıiletken malzemeye, kristal yapısı bozulmayacak şekilde periyodik tablonun III. sütununda bulunan bir element katkılı olduğu zaman p-tipi yarıiletken oluşur. Örneğin periyodik tablonun IV. sütunda bulunan Silisyum (Si) atomu ile periyodik tablonun III. sütunda bulunan Bor (B) atomu ile katkılı olduğunda yarıiletken atomları ile katkı atomları arasında Şekil 2.4’de görüldüğü gibi kovalent bağ oluşur. Ancak katkılanan elektronun son yörüngesinde üç elektron olduğu için bir bağda bir elektron eksik kalır ve bu elektron eksikliğine “deşik” denir.



Şekil 2.4 p-tipi katkılı yarıiletken oluşumu

Deşiklerin taşıyıcı yoğunluğu elektronların taşıyıcı yoğunluğundan büyük olan katkılı yarıiletkenlere “p-tipi yarıiletkenler” denir [12]. p-tipi yarıiletken kristalde deşik üreten katkılar “alıcı (akseptör)” olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletken malzemelerde çoğunluk taşıyıcılar deşikler (p_p), azınlık taşıyıcılar elektronlar (n_p)’dir.

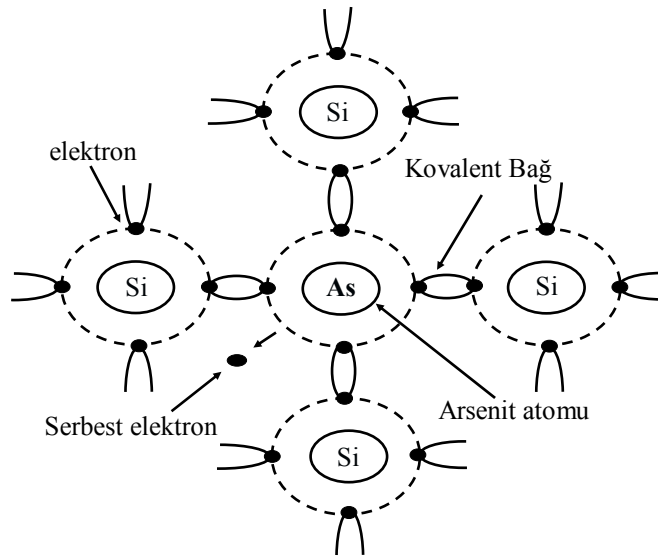
p-tipi yarıiletkenlerde alıcı enerji düzeyleri (E_A), Şekil 2.5’de görüldüğü gibi yasak enerji aralığındadır.



Şekil 2.5 p-tipi yarıiletkenin bant yapısı

2.4.2.2 n-tipi Yarıiletkenler

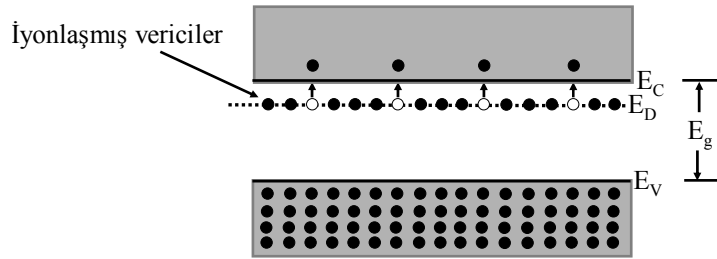
Saf bir yarıiletken malzemeye, kristal yapısı bozulmayacak şekilde periyodik tablonun IV. sütununda bulunan bir element katıldığında n-tipi yarıiletken oluşur. Örneğin periyodik tablonun IV. sütunda bulunan Silisyum (Si) atomuna bu sefer periyodik tablonun V. sütunda bulunan Arsenit (As) atomu katıldığında Şekil 2.6’da görüldüğü gibi Si ve As atomlarının son yörüngesindeki dört elektron arasında kovalent bağ oluşur. As atomunun son yörüngesindeki bir elektron ise bağ yapmaz ve bu elektron atoma zayıf bağlı olduğundan kristale küçük bir enerji verildiğinde kristal içinde serbest hareket eder. Bu elektron kristalin taşıyıcı yoğunluğunu artırır.



Şekil 2.6 n-tipi katkılı yarıiletken oluşumu

Elektronların taşıyıcı yoğunluğu deşiklerin taşıyıcı yoğunluğundan büyük olan katkıli yarıiletkenlere “n-tipi yarıiletkenler” denir [12]. n-tipi yarıiletkenlerde kristale bir elektron veren katkılar “verici (donör)”olarak adlandırılır. n- tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk taşıyıcılar (n_n), deşikler ise azınlık taşıyıcılar (p_n)’dır.

n-tipi yarıiletkenlerin verici enerji düzeyleri (E_D), Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yasak enerji aralığındır.



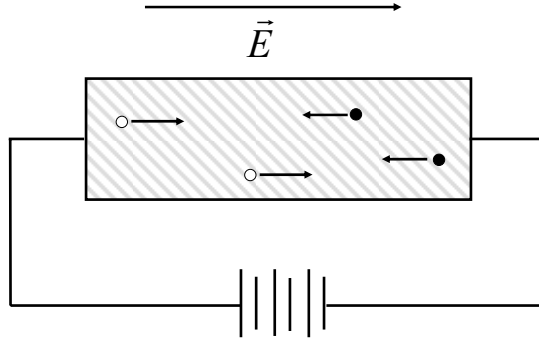
Şekil 2.7 n-tipi yarıiletkenin bant yapısı

n-tipi bir yarıiletken malzemeye yeteri kadar alıcı atomlarının katkılanması ile yarıiletken malzeme katkısız yarıiletkene dönüşebilir, yine bu malzemenin alıcı yoğunluğunu artırarak malzeme p-tipi yarıiletken haline, yine bu malzemeye verici atomların katkılanması ile katkısız yarıiletken haline ve yine verici atomların katkılanması ile n-tipi yarıiletkene dönüştürülebilir [11]. Bu işlemler malzeme yarıiletken özelliğini kaybedinceye kadar devam edilebilir ve yarıiletkenlerin bu özellikleri entegre devre yapımında çok önemlidir [11].

2.5 Elektriksel İletkenlik

Termal dengede katı içinde yük taşıyıcılarının sabit bir hareketi vardır. Bu hareket katı içindeki kristal yapı bozukluklarından, örgü atomlarından veya safsızlıklardan saçılan taşıyıcılardan dolayı gelişmiş güzel bir hareket oluşturduğu için net akım oluşmaz [8].

Dışarıdan bir elektrik alan uygulanırsa katı üzerinden net bir akım geçer. Yarıiletken malzemeye elektrik alan uygulandığında Şekil 2.8’de görüldüğü gibi elektronlar elektrik alan ile zıt yönde hareket ederken, deşikler ise elektrik alan ile aynı yönde hareket eder [11]. Deşikler elektrik alan ile aynı yönde hareket ettiği için pozitif yüklü parçacıktır.



Şekil 2.8 Elektrik alan altında yarıiletkendeki elektron ve deşiklerin hareketi

Elektronların ve deşiklerin elektrik alandan etkilenmesinden dolayı her ikisi de elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar [5]. Deşiklerin ve elektronların elektrik alandan dolayı hareket etmesiyle yarıiletken malzemede net bir akım oluşur. Oluşan bu akıma “sürüklenme akımı” denir.

Yarıiletken malzemede oluşan sürüklenme akımı

$$J = ne\mu_e E + pe\mu_h E = (ne\mu_e + pe\mu_h)E \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki n birim hacimdeki elektronların sayısı, μ_e elektronların mobilitesi, p birim hacimdeki deşiklerin sayısı ve μ_h deşiklerin mobilitesidir.

Yarıiletkenlerde mobilite (hareketlilik) birim elektrik alandaki parçacığın sürüklenme hızı olup

$$\mu = \frac{|\bar{v}_d|}{|\bar{E}|} \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Mobilite elektron ya da deşik hareketine, sıcaklığa, malzemenin saflığına bağlı olarak değişir [11].

Yarıiletkendeki iletim bandındaki elektronların mobilitesi;

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki τ_e elektronların yarılanma süreleri ve m_e^* elektronun etkin kütesidir.

Yarıiletkendeki valans bandındaki deşiklerin mobilitesi ise;

$$\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*} \quad (2.5)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki τ_h deşiklerin yarılanma süreleri ve m_h^* deşiklerin etkin kütesidir.

Elektronların ve deşiklerin mobilitesini örgü saçılmaları ve safsızlık saçılmaları etkileyebilir [13]. Örgü saçılması nedeniyle kristal boyunca hareketli bir taşıyıcı, ısıt titreşimler ile normal konumun dışında bulunan atomlarla karşılaşır ve bu durumda frekans artacağından sıcaklık artışı olur, sıcaklık artışı ile de mobilite azalır [13]. İyonlaşmış safsızlık yoğunluğu ile katkılama yapılan numunelerde saçılma daha çok olacağından taşıyıcı mobilitesi; düşük katkılama yapılan numunelerinkinden daha düşüktür [13]. Örgü saçılmasının yüksek sıcaklıklarda ve safsızlık saçılmasının düşük sıcaklıklarda baskın olmasını beklenir.

Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik eşitlik (2.2)'den

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikten de görüldüğü gibi yarıiletkenin iletkenliği taşıyıcı yoğunluğuna ve mobiliteye bağlıdır.

Eşitlik (2.6) Eşitlik (2.2)'de yerine yazılırsa

$$J = \sigma E \quad (2.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitliğe ohm yasası denir.

İletkenliğin tersi olarak ifade edilen özdirenç

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_h)} \quad (2.8)$$

eşitliği ile verilir.

İletkenlerin özdirençleri 10^{-6} ohm-cm civarında yarıiletkenlerin özdirençleri 10^{-2} – 10^9 ohm-cm arasında ve yalıtkanların özdirençleri 10^{14} – 10^{20} ohm-cm arasındadır [5]. Burada görüldüğü gibi yarıiletkenlerin özdirençleri iletkenler ile yalıtkanlar arasındaki geniş bir bölgeye düşer.

2.6 Difüzyon Akımı

Bir yarıiletken malzemedeki yüklerin çok yoğun ortamdan az yoğun ortama doğru hareket etmesinin sonucunda oluşan akıma “difüzyon akımı” denir. Difüzyon

akımı ele alınan kristal içindeki yük yoğunluğunun konuma göre değişmesi yani bir yük yoğunluğu gradyanının değişmesinden kaynaklanır.

p-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar deşikler olduğu için difüzyon akımı deşiklerin çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçmesi ile sağlanır. Deşiklerin oluşturduğu difüzyon akım yoğunluğu

$$J_{h(dif)} = -eD_h \frac{dp}{dx} \quad (2.9)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki D_h deşiklerin difüzyon katsayısıdır.

n-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar elektronlar olduğu için difüzyon akımı elektronların çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçmesi ile sağlanır. Elektronların oluşturduğu difüzyon akım yoğunluğu

$$J_{e(dif)} = eD_e \frac{dn}{dx} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki D_e elektronların difüzyon katsayısıdır.

Bir yarıiletken malzemede oluşan toplam difüzyon akımı

$$J_{dif} = -eD_h \frac{dp}{dx} + eD_e \frac{dn}{dx} \quad (2.11)$$

eşitliği ile verilir.

Bir yarıiletken malzemede yoğunluk değişimine ek olarak dışarıdan da bir elektrik alan uygulandığı zaman yarıiletkende hem sürüklenme akımı hem de difüzyon akımı oluşacağından toplam akım

$$J = J_{drift} + J_{dif} \quad (2.12)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlik (2.2) ve Eşitlik (2.11) eşitlikleri Eşitlik (2.12) de yerlerine yazılırsa

$$J = ne\mu_e E + pe\mu_h E + eD_e \frac{dn}{dx} - eD_h \frac{dp}{dx} \quad (2.13)$$

eşitliği elde edilir.

Yukarıdaki denklemler düşük elektrik alan altındaki aygıt operasyonları için önemlidir [2]. Ancak yüksek elektrik alan altında $\mu_n E$ ve $\mu_h E$ sürüklenme hızı ile değişir [2].

3. P-N EKLEM

3.1 Giriş

p-n eklem 1940 yılında Ohl tarafından keşfedilmiştir ve bir p-n eklemde p-tipi bölgede ileri besleme durumunda diyot üzerinden büyük akım geçerken n-tipi bölgede ters besleme durumunda ise diyot üzerinden küçük bir akım geçtiğini bulmuştur. Daha sonra da Bell Laboratuvarlarında p-tipi alıcı safsızlıkları ile n-tipi verici safsızlıkları arasındaki ilişkiyi bulmuşlardır. 1949 yılında Shockley tarafından p-n eklem diyot denklemi bulunmuştur.

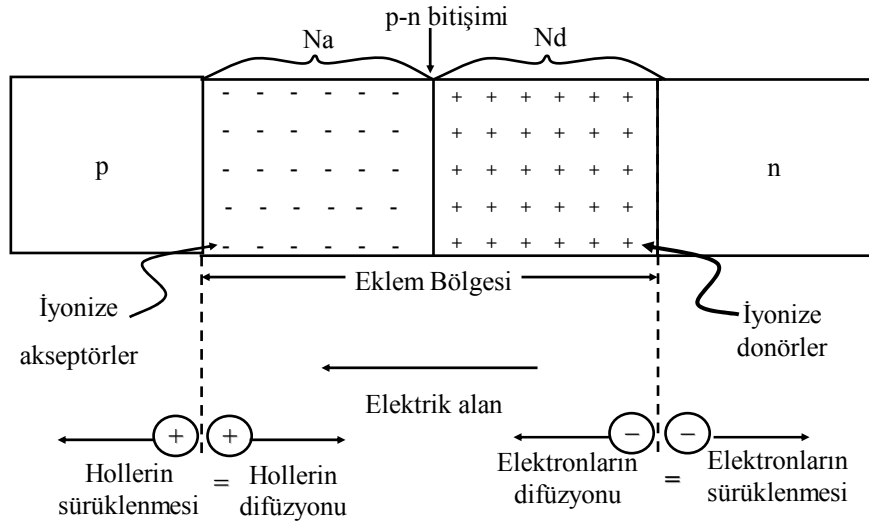
p-n eklem; p-tipi yarıiletkende n-tipi bir bölge oluşturulması veya n-tipi yarıiletkende bir p-tipi bölge oluşturulması ile elde edilir ve p-n eklemleri oluşturulurken en önemli nokta, yarıiletkenin kristal yapısının bozulmamasıdır [14]. Bir yarıiletkende p-tipi ve n-tipi bölgeleri oluşturulurken katkı oranları az, orta veya çok katkılı olabileceğinden p-n eklemleri farklı davranışlar göstermesinden dolayı çok çeşitli ve çok sayıda p-n eklem vardır [11].

p-n eklem modern yarıiletken güç cihazların temel yapı taşlarını oluşturur [15]. Böylece p-n eklemler modern elektronik uygulamaların ve yarıiletken cihazların anlaşılmasında büyük önem taşır. p-n eklemlerin doğrultma ve anahtarlama gibi elektronik devrelerde temel işlevleri vardır [16]. Yapısında p-n eklem bulunan elektronik elemanlara örnek olarak p-n eklem diyot, transistör, güneş pili verilebilir.

3.2 p-n Eklemi Temel Yapısı

p-tipi yarıiletkende deşiklerin konsantrasyonu, n-tipi yarıiletkende ise elektronların konsantrasyonu büyüktür. Bundan dolayı bir p-tipi yarıiletkende n-tipi bir bölge oluşturulduğu zaman ya da n-tipi yarıiletkende bir p-tipi bölge oluşturulduğu zaman yani bir p-n eklem oluşumu sırasında büyük konsantrasyon gradyandı oluşur. Bu durumda p-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcılar olan deşikler n-tipi bölgeye doğru difüz ederken, n-tipi bölgedeki çoğunluk taşıyıcılar olan elektronlar ise p-tipi bölgeye doğru difüz ederler [17].

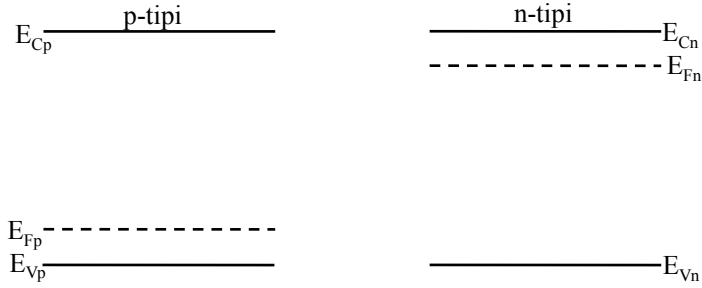
Şekil 3.1’de görüldüğü gibi deşiklerin p-tipi bölgeden ayrılması ile geride eksi (-) yükler kalırken elektronların n-tipi bölgeden ayrılması ile de geride artı (+) yükler kalır [18]. Deşiklerin ve elektron difüzyonları denge kuruncaya kadar yani p-tipi ile n-tipi yarıiletkenin Fermi enerjileri eşit oluncaya kadar devam eder [14]. Denge durumunda yük geçişlerini engelleyecek bir elektrik alan oluşur. Bu durumda eklem yüzeyinin her iki tarafındaki bölge serbest taşıyıcılar açısından arınmış bölgedir. Bu bölgeye “tüketim bölgesi, uzay yük bölgesi veya eklem bölgesi” denir.



Şekil 3.1 p-n eklem oluşumu

3.3 p-n Ekleminde Kontak Potansiyeli

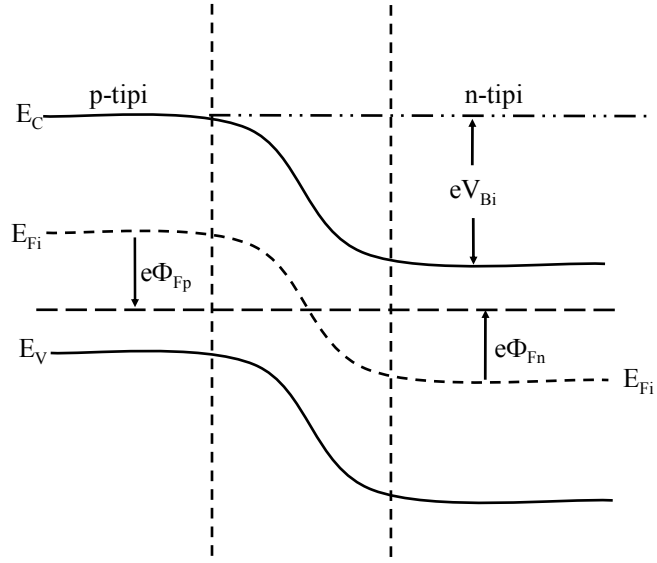
p-n eklem oluşmadan önceki p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı Şekil 3.2’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi p-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi valans bandının hemen üzerinde bir yerde iken n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi iletim bandının hemen altında bir yerdedir.



Şekil 3.2 p-n eklem oluşmadan önceki p-tipi ve n -tipi yarıiletkenin enerji-band diyagramı

p-n eklem oluşum esnasında p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin Fermi enerjileri denge durumunda eşitleneceğinden eklem bölgesinde Şekil 3.3’de görüldüğü gibi valans ve iletim bandlarında bir bükülme meydana gelir. Bunun sebebi ise p-n eklem oluşurken tüketim bölgesinde meydana gelen eV_{Bi} enerjisidir [16]. Oluşan bu potansiyele “kontak potansiyeli” ya da “dahili potansiyel” denir ve V_{Bi} ile ifade edilir [15].

Kontak potansiyeli oluştuğunda her iki bölgedeki çoğunluk taşıyıcıların difüzyonu sona ererken her iki bölgedeki azınlık taşıyıcılar sürüklenme yoluyla karşı tarafa geçebilir. Bundan dolayı kontak potansiyeli denge niceliğidir. Bu potansiyelin büyüklüğü Kelvin prob kullanılarak ölçülebilir [18].



Şekil 3.3 Denge durumundaki p-n eklemnin enerji-band diyagramı

p-n eklemde oluşan kontak potansiyeli

$$V_{Bi} = |\Phi_{Fn}| + |\Phi_{Fp}| \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki Φ_{Fn} n-tipi tarafta oluşan potansiyel ve Φ_{Fp} p-tipi tarafta oluşan potansiyeldir.

p-tipi bölgede valans bandındaki deşik konsantrasyonu

$$p_0 = N_a = n_i \exp\left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right] \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki N_a akseptör katkı yoğunluğu, n_i ; saf taşıyıcı konsantrasyonu, E_{Fi} Fermi enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

p-tipi bölgedeki potansiyel

$$q\Phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3.3) Eşitlik (3.2)'de yerine yazılıp düzenlenirse;

$$\Phi_{Fp} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (3.4)$$

eşitliği elde edilir.

n-tipi bölgede iletim bandındaki elektron konsantrasyonu

$$n_0 = N_d = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right] \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki N_d donör katkı konsantrasyonu, n_i ; saf taşıyıcı konsantrasyonu, E_{Fi} Fermi enerjisi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

n-tipi bölgedeki potansiyel

$$e\Phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (3.6)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3.6) Eşitlik (3.5)'de yerine yazılıp düzenlenirse;

$$\Phi_{Fn} = -\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.7) Eşitlik (3.1)'de yerine yazılırsa

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilir. Kontak potansiyeli, p-n eklem sıcaklığına, alıcı ve verici katkı yoğunluklarına göre değişir.

3.4 p-n Eklem Elektrik Alanı

p-n eklemde eklem bölgesindeki pozitif ve negatif uzay yük yoğunluklarının ayrılması ile eklem bölgesinde bir elektrik alan oluşur [17]. Elektrik alan Poisson denklemlerinden elde edilir ve tek boyutlu Poisson denklemi

$$\frac{d^2 \Phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{dE(x)}{dx} \quad (3.9)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki $\Phi(x)$ elektrostatik potansiyel, ρ uzay yük yoğunluğu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti ve $E(x)$ elektrik alandır. Bu Poisson denklemi çözüldüğünde elektrik alan

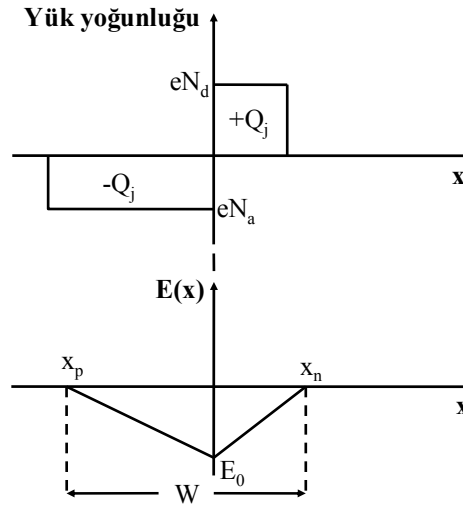
$$E = -\frac{eN_a}{\epsilon_s}(x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0 \quad (3.10)$$

$$E = -\frac{eN_d}{\epsilon_s}(x_n - x), \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (3.11)$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik (3.11) ile Eşitlik (3.12)'in sol tarafları eşit olduğundan sağ tarafları da birbirine eşit olacağından

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik p-tipi bölgedeki birim alandaki deşiklerin sayısının, n-tipi bölgedeki birim alandaki elektronların sayısına eşit olduğunu gösterir. Eşitlik (3.12) elektronik aygıtların işleyişini açıklamada oldukça önemlidir.



Şekil 3.4 Bir p-n eklem b6lgesindeki uzay yük yoğunluğu ve elektrik alan değişimi

3.5 Eklem Bölgesinin Genişliği

Eklem bölgesi yasak enerji aralığındaki bir konumda difüzyon esnasında tekrar birleşerek nötrleşen elektron-deşik çiftlerini içerir [14]. Eklem bölgesi sınırları içinde taşıyıcı bulunamayacağından bu bölge yalıtıcıdır.

p-tipi bölge tarafındaki eklem bölgesinin genişliği

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_d}{N_a} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

eşitliği ile verilir.

n-tipi bölge tarafındaki eklem bölgesinin genişliği ise

$$x_n = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a}{N_d} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

eşitliği ile verilir. p-n eklemdeki eklem bölgesinin genişliği Eşitlik (3.14) ile Eşitlik(3.13) toplamlarına eşit olur. Böylece eklem bölgesinin genişliği

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

eşitliği ile verilir.

3.6 Eklem Kapasitansı

p-n eklemde eklem bölgesi yalıtkan olup bu bölgenin iki tarafı ise yarıiletken bölgelerden oluşur. Bundan dolayı p-n eklem paralel plakalı bir kondansatör gibi davranır. p-n eklem dışarıdan uygulanan voltajın değişmesi ile p-n eklem içerisindeki yükün miktarı değişir ve bu değişim kapasitansını verir. Böylece eklem bölgesindeki kapasitans değişimi

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (3.16)$$

eşitliği ile verilir. p-n eklemının eklem bölgesinin yükü ile ilgili olan bu kapasitansa “eklem kapasitansı” veya “tüketim bölge kapasitansı” denir. Eşitlik (3.16)’daki Q

$$Q = eN_d x_p = eN_a x_n \quad (3.17)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik (3.17) Eşitlik(3.16) de yerine yazılırsa

$$C_j = \left[\frac{q\epsilon_s A^2}{2} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifade

$$C_j = \frac{A\epsilon_s}{W} \quad (3.19)$$

eşitliği ile verilebilir. Eşitlikteki C_j eklem kapasitansı, A diyodun alanıdır. Bir taraflı p-n eklemın katkı yoğunluğu ve eklem potansiyeli kapasitansın voltaja göre ölçümü kullanılarak bulunabilir. Kapasitansın karesinin tersi

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_i - V) \quad (3.20)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlik doğrusal bir bağımlılık gösterir.

Eklemin potansiyeli

$$\frac{d(1/C_j^2)}{dV_i} = -\frac{2}{q\epsilon_s A^2} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \quad (2.21)$$

eşitliğinden elde edilir yani, $1/C^2$ eğrisi ve voltaj ekseninin kesişmesinden bulunur. Katkı yoğunluğu ise eğrinin eğiminden elde edilir.

3.7 p-n Eklem Diyot

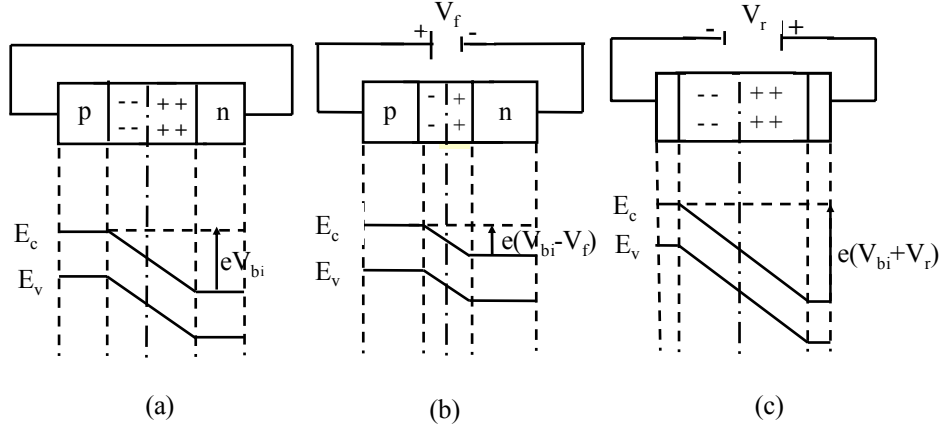
p-n eklem; p-tipi bölgesi n-tipi bölgesine göre pozitif olduğunda yani ileri besleme durumunda p-n eklem üzerinden büyük akım geçerken, p-tipi bölgesi n-tipi bölgesine göre negatif olduğunda yani ters besleme durumunda ise p-n eklem üzerinden çok küçük akım geçer. Bundan dolayı p-n eklem bir yönde akım geçiren bir devre elemanı, yani diyot olarak kullanılabilir. Böylece p-n eklem yarıiletken diyot görevini görür.

p-n eklem diyot; entegre devre teknolojisinde en temel yarıiletken cihazlarından biridir ve p-n eklem diyot karakterizasyon ve eklem özellikleri için kontrol etme aracıdır [19]. p-n eklem karakteristiklerinden eklem genişliği, katkı konsantrasyonu, termal tavlama ve kontak kalitesi tahmin edilebilir ve böylece diyot denklem çözümleri sadece cihazın karakterizasyonu ve uygulamaları için önemli değil aynı zamanda üretim süreci karakterizasyonu ve kalibrasyonu içinde önemlidir [19].

3.8. p-n Eklem Diyotun I-V Karakteristikleri

p-n eklem diyotun I-V karakteristikleri; p-n eklem diyot uçlarına uygulanan gerilim ile p-n eklem diyotun üzerinden geçen akım arasındaki ilişkiyi gösterir. p-n eklem diyot doğru ve ters besleme altında farklı davranışlar sergiler.

p-n eklem diyota dışarıdan bir voltaj uygulanırsa p-n eklem diyot beslenmiş olur. Böylece p-n eklemden denge durumu bozulur yani deşiklerin ve elektronların arasındaki difüzyon ve sürüklenme akımlarındaki denklilik bozulur. Böylece diyot üzerinden net bir akım geçer.



Şekil 3.5 p-n eklem diyotta uygulanan gerilimin etkileri;

(a) denge durumu, (b) ileri besleme durumu ve (c) ters besleme durumu için enerji band diyagramları

Şekil 3.5(a)'da dışarıdan bir gerilim uygulanmadan önceki bir p-n eklem diyotun nötr bölgeleri ve eklem bölgesi gösterilmiştir. Bu durumda diyotun eklem bölgesinde eV_{bi} kadar bir potansiyel enerji meydana gelir.

p-n eklem diyotun Şekil 3.5(b)'de görüldüğü gibi p-tipi tarafına pozitif n-tipi tarafına negatif olacak şekilde dışarıdan bir gerilim uygulanırsa diyot ileri beslenmiş durumda olur ve V pozitifdir. Bu durumda p-n eklem diyotun p-tipi bölgesindeki elektron enerji düzeyleri n-tipi bölgesine göre aşağıya iner [20]. Enerji engeli azaldığı için n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye elektronların ve deşiklerin akışı artar [20]. Böylece elektronlar ve deşikler p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye oluşan net elektrik akımına katkıda bulunurlar.

p-n eklem diyotun Şekil 3.5(c)'de görüldüğü gibi p-tipi tarafına negatif n-tipi tarafına pozitif olacak şekilde bir gerilim uygulanırsa eklem ters beslenmiş durumda

olur ve V negatiftir. Bu durumda p-n eklem diyotun elektronların n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru akışı ve deşiklerin p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru akışları potansiyel engelin artışıyla dolaylı olarak azalır [3]. n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru küçük bir elektrik akımı oluşur [3]. Oluşan bu akıma “doyum akımı” denir. p-n eklem diyot ters besleme durumunda bu akım değerinden başka akım değeri geçirmediği için bir doğrultucu görevi görür [14].

p-n eklem diyota dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman üzerinden geçen toplam akım

$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV_D}{nkT} - 1 \right] \quad (2.22)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki I_0 doyum akımı, V_D diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Eşitlik (2.22)'deki n idealite faktörü çekilirse

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.24)$$

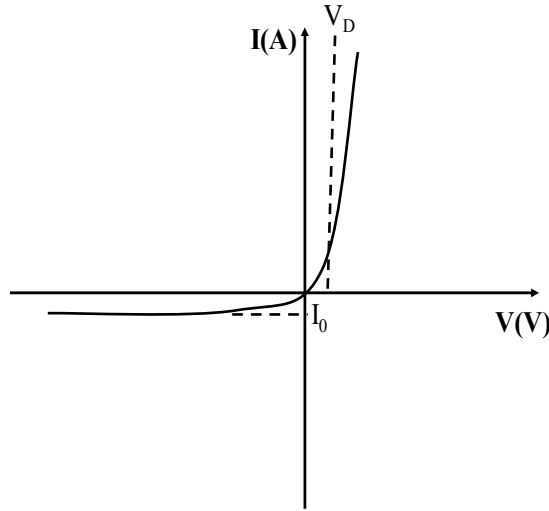
eşitliği elde edilir. n idealite faktörü; gerilim ve sıcaklığa bağlı deneysel bir değişkendir [20]. İdealite faktörü ideal diyot karakteristiğinden olan sapmayı belirler. Yarıiletken aygıtların için en önemli parametre idealite faktörüdür, çünkü idealite faktörü bu aygıtların elektriksel davranışlarını açıklar [21].

Eklem bölgesinde yeniden-birleşme göz önüne alınırsa idealite faktörü $1 < n \leq 2$ arasında bir değer alır [22]. Eğer eklem bölgesinde taşıyıcı yeniden-birleşmenin olmadığı kabul edilirse idealite faktörü $n=1$ olur [22]. İdealite faktörü 1'e eşit ise bu diyota “ideal diyot” denir.

İdeal p-n eklem diyota dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman diyot üzerinden geçen toplam akım

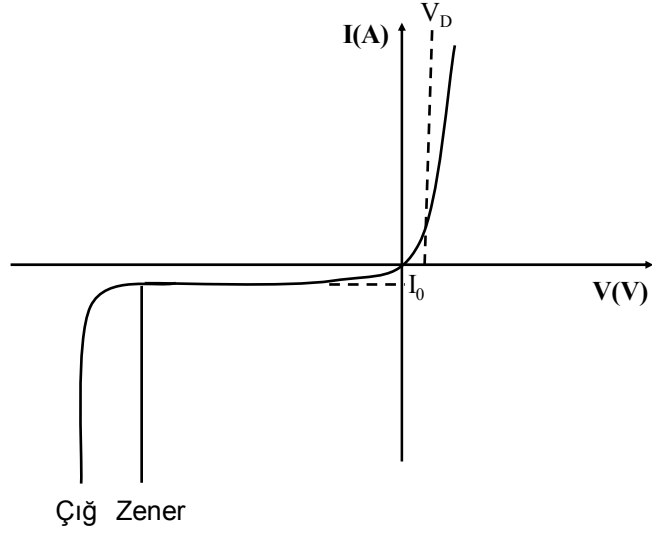
$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right] \quad (2.22)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki V_D diyot üzerine düşen gerilim, I_0 doyum akımı, k Boltzmann sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklığıdır. İdeal p-n eklem diyot modeli için akım-gerilim (I-V) karakteristiği Şekil 3.6’da verildiği gibidir.



Şekil 3.6 İdeal p-n eklem diyotun I-V grafiği

İdeal p-n eklem diyotta ileri besleme durumunda akım eksponansiyel olarak artarken, ters besleme durumunda ise akım I_0 doyum akımından sonra sabit kalmaktadır [3]. I_0 doyum akımı değerinden sonra voltaj değeri arttırılırsa eklem bölgesindeki elektrik alan büyür ve elektrik alanın belli bir değerinden sonra eklemden büyük bir akım geçer [14]. Bu olaya “eklem kırılması” denir. Eklem kırılması Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi çığ ve zener tipi olmak üzere iki guruba ayrılır ve çığ tipinde akım daha yumuşak zener tipinde akım daha sert şekilde artmaktadır [14].



Şekil 3.7 Ters besleme durumunda p-n eklem zener ve çığ tipi kırılmaları

3.9 p-n Eklem Diyot Direnci

p-n eklem diyotun elektriksel olarak direnci; diyot uçlarındaki gerilim ile diyot üzerinden geçen akımın oranı

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.23)$$

eşitliği ile verilir. Ancak R büyüklüğü V ve I 'ya bağımlı olarak çok fazla değiştiğinden ΔI akım aralığındaki ΔV değişimine bağlı olarak,

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.24)$$

şeklinde tanımlanması daha uygundur.

3.10 Omik Kontak

İleri ve ters besleme durumlarında akımın iletildiği kontaklara “omik kontak” denir. Omik kontak metal ile yarıiletken arasında gerçekleşir.

Yarıiletken yüzeyde omik kontak oluşturulması için yarıiletkenin yüksek katkılı olması gerekir. Bundan dolayı yarıiletkende omik kontak oluşturmak için yarıiletken yüzey metal ile kaplanır. Metaldeki elektronların yarıiletken yüzeye difüzyon etmesi için ısıtılma işlemi yapılır.

Metaldeki elektronların ısıtılma sonucu yarıiletken yüzeye geçmesi ile yarıiletken yüzeyin katkı konsantrasyonu artar. Bu nedenle p ve n-tipi katmanlara kontak yapılacak metalin seçimi önemlidir. Yarıiletkende katkı konsantrasyonu arttıkça bariyer yüksekliği azalır ve elektronlar tünelleme yolu ile yarıiletken yüzeye kolaylıkla geçerler.

İdeal bir omik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal olmalıdır. Omik kontakın direnci yarıiletkenin bulk direncine göre veya yarıiletkenin seri direncine göre çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.[2] Omik kontakın direncini azaltmak için aygıtın aktif bölgesi ile metal arasına yüksek katkılı yarıiletken yerleştirilmelidir. Kontak oluşturacak metalin yarıiletkene iyi difüz etmesi, metal-yarıiletken engelini daraltır. Böylece taşıyıcıların transferi tünelleme ile olabileceğinden, kontak seri direnci azalır ve akım iletimi iyileşir.

Omik kontakların spesifik kontak dirençleri

$$R_C = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (2.25)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki J akım yoğunluğu ve R_C kontak direncinin birimi $\Omega\text{-m}^2$ 'dir. Eşitlik (1.34) düzenlenirse

$$R_C = \frac{k}{eA^*T} \exp\left(\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.26)$$

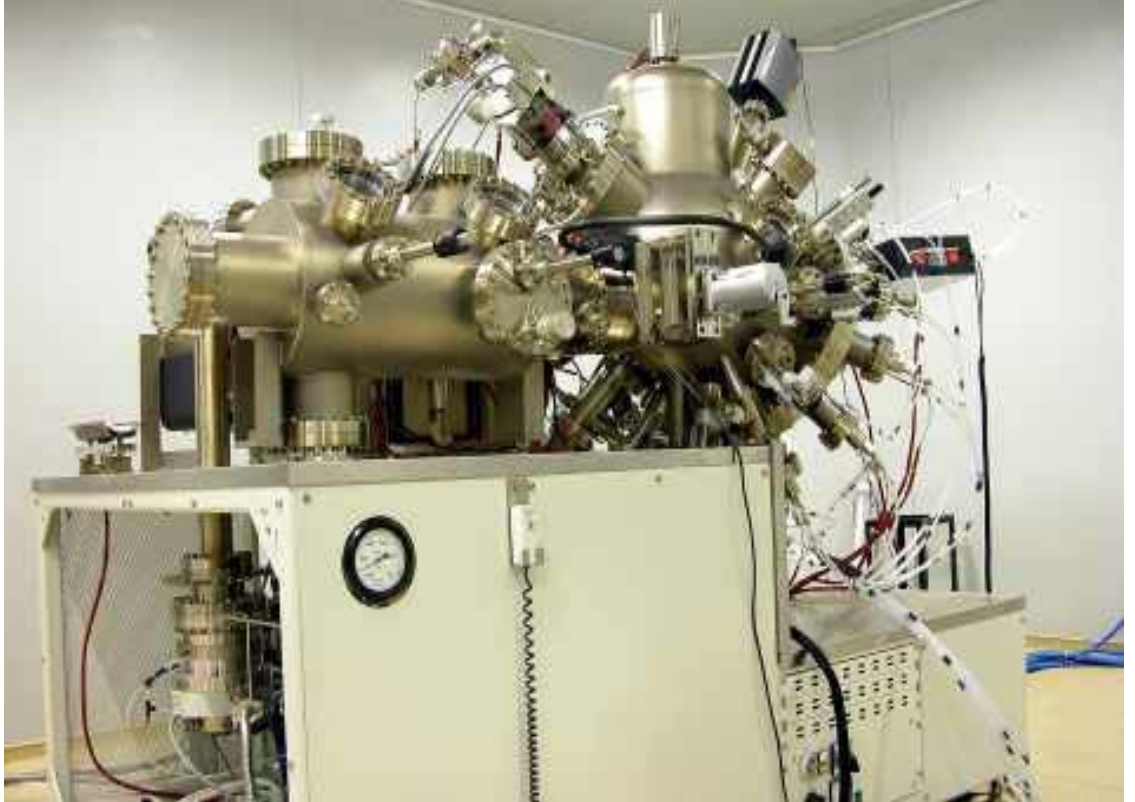
eşitliği elde edilir. Bu eşitlik düşük bariyer yüksekliğine sahip metal-yarıiletken kontaklarda küçük kontak direnci (R_C) elde etmek için kullanılır [2].

İdeal bir omik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal olması gerekir. İncelen bir yapının eğer I-V karakteristikleri doğrusal değilse, metal-yarıiletken arasında bir engel oluşmuştur; bu engeli azaltmak için yapıya termal tavlama işlemi uygulanır. Bu tavlama işlemin sonucunda metal-yarıiletken arasındaki ohmik kontakın I-V karakteristikleri doğrusal hale gelmeye başlar [24]. Tavlama sıcaklıkları artırılarak omik kontakın I-V karakteristiğinde istenilen doğrusallık elde edilir.

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

4.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yüksek kaliteli mono tabakaları üretebilen Ultra Yüksek Vakum (UHV) tabanlı bir tekniktir. 1970’lerde MBE sayesinde yüksek saflıktaki yarıiletkenlerin üretilebilmesiyle, MBE tekniği süperiletkenlerin, yalıtkanların ve metallerin araştırma ve endüstriyel düzeyde epitaksiyel üretiminde yaygın olarak kullanılır. Kristal büyütme sistemi olan ve Şekil 4.1’de görülen “Moleküler Demet Epitaksi (MBE)” ülkemizde ilk defa Gazi Üniversitesi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarında (STARLAB) kurulmuştur.



Şekil 4.1 VG80H MBE modeli.

MBE sistemi; alttaş yükleme odası, temizleme odası ve büyütme odası olmak üzere  ana kısımdan oluşmaktadır. Bu odalar birbirinden vakum vanaları vasıtasıyla ayrılmıştır. Böylece büyütme odasının mümkün olduğu kadar temiz tutulması sağlanmıştır.

Büyütme odasına bağlı olan soğuk (cryogenic) pompa, iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası ve turbo pompası sayesinde bu oda ultra yüksek vakuma ulaşmaktadır.

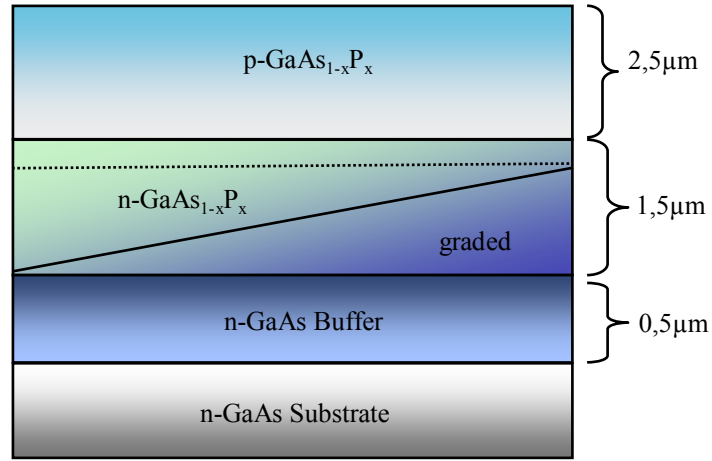
MBE sisteminde 2 tane galyum, 2 tane indiyum, 1 tane alüminyum, 1 tane galyum fosfat, 1 tane arsenik, 1 tane azot, 1 tane berilyum ve 1 tane silisyum hcreti olmak üzere toplam 10 adet kaynak hücreye sahiptir.

Yarıiletken retme tekniklerinin en önemlisi olan MBE sistemi basit bir yöntem ile çalışır. Bu sistemin temelinde ısıtılan katı yüzeyinden elde edilen atom veya atom kümeleri vardır. Isıtılan katı yüzeyinden elde edilen atom veya atom kümeleri UHV (10^{-8} – 10^{-11} Torr) ortamına gönderilir. Bu ortam ultra yüksek vakum sayesinde yabancı ve artık gazlardan temizlendiğinden dolayı UHV ortamına gönderilen atom veya atom grupları direk olarak alttaş üzerindeki sıcak yüzeye ulaşırlar. Yüzeye gelen atom veya atom kümeleri yayılır ve büyüyen filmle birleşirler.

UHV şartlarından dolayı MBE sistemindeki büyütme, termodinamik dengeden bağımsız sayılabilir. Bu özelliğinden dolayı MBE'nin diğer tekniklere göre avantajı, ultra yüksek vakum şartlarında kristalin büyütülmesi; RHEED (Reflection High-Enerji Electron Diffraction), AES (Auger Elektron Spectroscopy), Elipsometri v.b ölçümleri ile kontrol edilebilmesidir.

4.2 Materyal Büyütme Süreci

Bu çalışmada diyot özellikleri incelenen p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklemının şematik gösterimini Şekil 4.2’de verildi. Bu yapı (100) yönelimli Si katkılı n-GaAs alttaş üzerine p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs MBE sistemi ile büyütüldü.



Şekil 4.2 p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem yapısının şematik gösterimi

p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapımızı büyütme sürecinde ilk önce alttaştan gelebilecek kirlilik ve yapı kusurlarının aktif tabakalara geçmesini engellemek amacı ile Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi n-GaAs alttaş tabaka üzerine, 0,5 µm kalınlıklı tampon (buffer) tabaka büyütüldü. Bu tampon tabaka üzerine de örgü uyumunu sağlamak için doğrusal artımlı olarak 1,5 µm kalınlıklı n-GaAs_{1-x}P_x büyütüldü. Bu tabakada doğrusal artımlı kısmın kalınlığı 1 µm (Şekil 4.2’de n-tipi tabakada eğimli çizgi ile gösterilen kısım) ve hedeflenen x=0.23 alaşım oranına ulaşacak oranda P akısının artış süresi ayarlandı. Ulaşılan bu alaşım oranında 0.5 µm kalınlığında (Şekil 4.2’de noktali çizgi ile p-tipi katman arasındaki kısım) n-GaAs_{1-x}P_x büyütmeye devam edildi. Bu tabaka üzerine de 2,5 µm kalınlıklı p-GaAs_{1-x}P_x katmanı büyütülerek p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem yapımız elde edildi. Bu yapıda MBE sisteminde büyütme yapılırken n-tipi katkılama için Silisyum (Si) ve p-tipi katkılama için Berilyum (Be) kaynakları kullanıldı.

4.3 Hızlı Termal Tavlama

LC-3-SY061 model numarasına sahip Hızlı Termal Tavlama sistemi Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Hızlı Termal Tavlama sistemi çeşitli gaz ortamlarında (N, Ar, O₂...vb...) tavlama yapılabilecek bağlantılara sahip, lambalı ısıtıcı ile yüksek sıcaklıklara hızla çıkabilen bir tavlama fırınıdır.



Şekil 4.3 Hızlı Termal Tavlama (RTA) Sistemi.

Hızlı termal tavlama sistemi, azot gazı atmosferinde yüksek vakum ortamında en fazla 3 inç'lik yarıiletken yapıların tavlama için kullanılır. Yüksek vakum bölmesi paslanmaz çelikten yapılmıştır.

Hızlı termal tavlama sistemi kademeli ısıtıcıya sahiptir. Bu ısıtıcının içinde bulunan lambalarının elektrik ile beslenmesiyle ısı sağlanır. Sistemde numunelerin lamba ile ısıtılması, sıcaklığın hızlı artması ve azalmasını sağlamaktadır. Bu sistemin içinde numunenin konması için numune tutucu vardır ve numune buraya yerleştirilir.

Hızlı termal tavlama sisteminde yüksek vakum elde edebilmek için pompa ünitesinde ön pompa olan membrane pompa ve turbo moleküler pompa bulunur. Membran pompa ile desteklenen turbo moleküler pompa 10^{-2} – 10^{-8} torr mertebelerinde vakum elde edilmesini sağlayarak tavlama işlemi için temiz ortam oluşmasını sağlar.

Hızlı termal tavlama sisteminde bulunan ana kontrol sistemi ise sistemin sıcaklık ve basıncının istenilen değere kademeli olarak çıkarılmasını sağlar. Ayrıca ana kontrol paneli tavlama sırasındaki sıcaklık ve basıncı görebilmemize olanak sağlar.

4.4 Kristal Temizleme

Deneysel ölçümlerden iyi bir sonuç alınabilmesi için büyütülen p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklemine üretiminde kullanılan yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekir. Kullanılan yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru iyi bir temizleme işlemi ile ortadan kaldırılabılır. Bu çalışmada kullanılan kristaller, yurtdışından CrysTec firmasından üretilen ve yüzeyi mekanik parlatılmış olarak satın alındığı için sadece kimyasal temizleme işlemi yapıldı.

Yarıiletken kristal yüzeyindeki organik ve diğer kirleri temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri gidermek için tüm kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Böylece temizlenen ve üzerine p-n eklemli p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs kristali büyütülen yarıiletken yapı, üzerine omik kontaklar

yapılmadan önce kimyasal olarak temizlendi. Yarıiletken kristallerin kimyasal olarak temizlenmesinde yapılan işlemler şöyledir:

1) Temizleme işleminde, RO&UP Water Purification Sistem' de hazırlanan yüksek dirençli (~16-18 MΩ) deiyonize su kullanıldı. Öncelikle temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız v.b. araç ve kaplar asetonla iyice yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra fırınında yaklaşık 80°C ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristaller önce aseton ve deiyonize su karışımında (1:5 ölçüğünde) ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandıktan sonra deiyonize su (H₂O) ile durulandı.

2) Kristal trikloretilen (C₂HCl₃) + aseton (CH₃COCH₃) + metil alkol (CH₃OH) içinde üç dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.

3) Sülfürik asit (H₂SO₄) ve hidrojen peroksit (H₂O₂)'in 1:1 hacim oranındaki karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda 5 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.

4) Eşit oranlardaki %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımı içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlendi ve ardından deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika süreyle yıkandı.

5) 3:1:5 hacim oranında nitrik asit (HNO₃), hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 5 dakika süreyle ultrasonik olarak temizlenip deiyonize su ile yıkandı.

6) 4:3 hacim oranında %38'lik hidroflorik asit (HF) ve deiyonize su karışımında 3 dakika süreyle ultrasonik olarak yıkandı.

7) n-tipi GaAs alttaş deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika sũreyle durulandı.

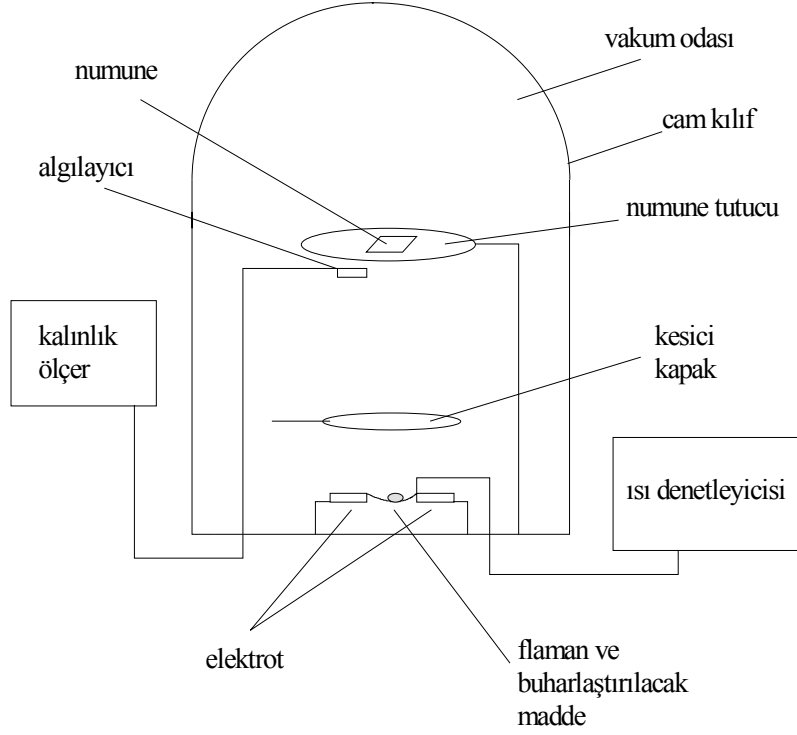
8) Son olarak kimyasal olarak temizlenmiş n-tipi GaAs kristal saf azot gazı ile kurulandı.

4.5 Omik Kontağın Oluşturulması

p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyota omik kontağın oluşturulması için Şekil 4.4’de gũrũlen ve Şekil 4.5’de Şematik olarak verilen yũksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanıldı.



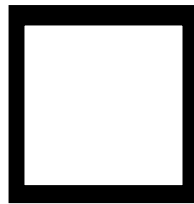
Şekil 4.4 Yũksek Vakum Termal Buharlaştırma sistemi



Şekil 4.5 Omik kontak oluşturulmasında kullanılan yüksek vakum termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.

p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklemine arka ve epitaksiyel yüzeyine omik kontaktların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maskeler ilk önce kimyasal olarak ultrasonik banyoda temizlendi. Temizleme işlemi, karbontetraklorür, trikloretilen ve aseton içerisinde 5 dakikalık süreler ile yapıldı ve sonra deiyonize su ile yıkandı. Fanus, NaOH çözeltisi ve deiyonize su kullanılarak temizlendi ve tüm parçalar yaklaşık 100°C’de fırınlanarak kurutuldu.

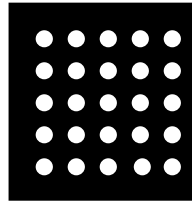
p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklemine ilk önce arka yüzeyine omik kontak alındı. Bunun için Şekil 4.6’da görülen 54 mm çaplı ve ≈280 µm kalınlıklı paslanmaz çelik maske kullanıldı.



Şekil 4.6 Arka omik kontak oluşturulurken kullanılan maske

Şekil 4.6’da görülen çelik maske numunenin arka yüzeyine yerleştirilip numune bir cımbız yardımıyla tutularak, vakum buharlaştırma ünitesinde bulunan numune tutucuya yerleştirildi ve sistemin kapağı kapatılarak sistem hemen vakum altına alındı. Vakum 10^{-6} Torr değerine kadar düşürüldü. Vakum $\approx 10^{-6}$ Torr değerine ulaştığında, flaman üzerinden akım geçirilerek %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) tel buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından kısa bir süre sonra kesici kapak yan tarafa çekilerek önceden ısıtılmış (450°C) GaAs alttaşın mat yüzeyine ≈ 2000 Å kalınlığında Au kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının sebebi, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine birikmesini önlemektir. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Au, vakum ortamında 450°C ’de 5 dakika tavlansın Au’ın n-GaAs içerisine difuz etmesi sağlandı. Daha sonra numenin sıcaklığı oda sıcaklığına geldiğinde sistem saf azot gazı ile doldurularak sistemin iç basıncı ile dış basıncı eşitlendikten sonra sistemin kapağı açıldı ve numune dışarıya alındı.

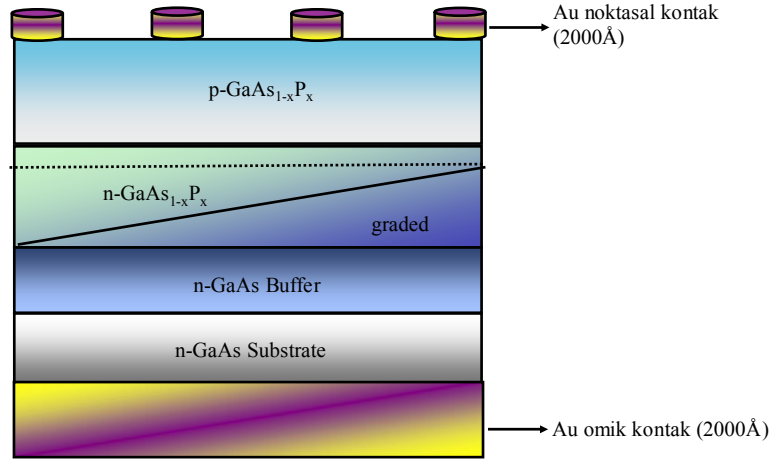
Numunenin arka yüzeyine omik kontak alındıktan sonra epitaksiyel tabaka yüzeyinde noktasal kontak alındı. Bu kontak için Şekil 4.7’de görülen üzerinde noktasal delikleri olan 2 mm çaplı maske yerleştirildi.



Şekil 4.7 Üst noktasal kontakların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maske

Numuneye Şekil 4.7’de görülen maske yerleştirildikten sonra numune sistemdeki numune tutucuya yerleştirildi ve yukarıda omik kontak alınması için yapılan işlemler uygulandı. Noktasal kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin epitaksiyel yüzeyine buharlaştırılan Au, vakum ortamında 450°C ’de 5 dakika tavlansın Au’ın p-GaAs_{1-x}P_x içerisine difuz etmesi sağlandı. Daha sonra numenin

sıcaklığı oda sıcaklığına geldiğinde sistem saf azot gazı (N₂) ile doldurularak açılır ve numune dışarıya alındı.



Şekil 4.8 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısının şematik gösterimi

Arka ve epitaksiyel tabakalara alınan omik kontaklar Şekil 4.8 gösterilmiştir. Arka ve epitaksiyel tabakalarına omik kontaklar alınan Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyota iletken teller gümüş pasta yardımı ile tutturuldu. Bu durumda p-n eklem diyot elektriksel ölçüm için hazır hale geldi.

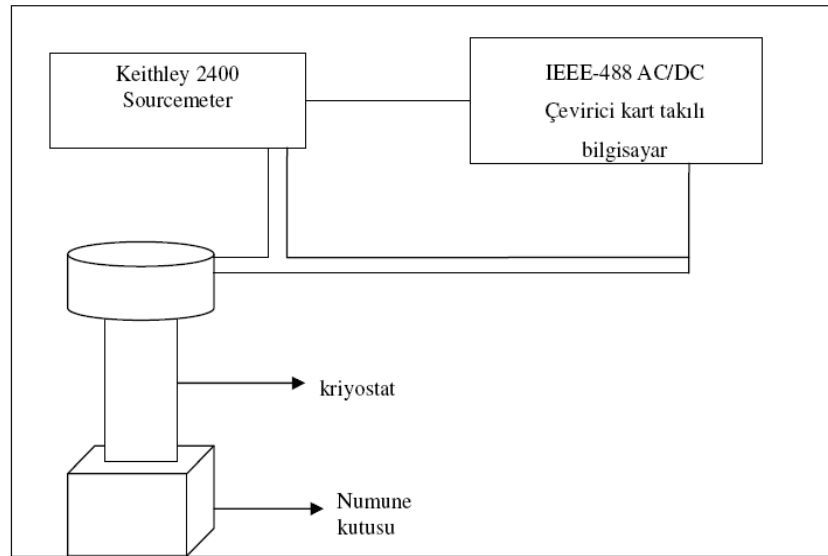
4.6 Akım-Voltaj (I-V) ölçüm düzeneği

Elektriksel ölçüm için hazır hale gelen Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyotun akım-gerilim (I-V) ölçümleri Şekil 4.9’da görülen Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı.



Şekil 4.9 Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi

Ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Tüm ölçümler Janis VPF-475 kriyostat içinde $\sim 10^{-3}$ Torr basınç altında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi.



Şekil 4.10 Akım-gerilim (I-V) ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Giriş

Bu bölümde, Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs (GS55 nolu numunenin) p-n eklem diyotun akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak bazı temel elektriksel parametreleri incelendi. Bu yapının tavlama sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında ileri besleme durumundaki I-V ölçümlerinden doyum akımı (I₀), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği (Φ_B(I-V)) hesaplandı. Tavlama işlemi sonucunda doyum akımı (I₀), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliğindeki (Φ_B(I-V)) değişimler incelenerek tavlama işleminin diyot parametrelerini ve kontakların omikliğini nasıl etkilediği incelendi.

5.2 I-V eğrilerinin karakteristiği

p-n eklem diyot için I-V karakteristik özellikleri Shockley denklemi ile açıklanır. Shockley diyot denklemi

$$I = I_0 \left[\exp \frac{qV_D}{nkT} - 1 \right] \quad (5.1)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki V_D diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve I₀ ise doyum akımı olup

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{q\Phi_b}{kT} \right) \quad (5.2)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikteki A diyotun alanı, A^* etkin Richardson sabiti ve Φ_b potansiyel engel yüksekliğidir. Eşitlik (5.2), Eşitlik (5.1)'de yerine yazılırsa;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.3)$$

şekline dönüşür. Ancak köşeli parantez içindeki 1 rakamı üstel ifade yanında oda sıcaklığı ve üstündeki değerler için ihmal edilirse;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) \right] \quad (5.4)$$

şeklini alır.

Eğer yapı, yarıiletkenin gövde direnci ve kontaklardan dolayı bir seri dirence sahip ise Eşitlik (5.4) ifadesi,

$$I = I_0 \left(\frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right) \quad (5.5)$$

şeklinde olacaktır. Eşitlikteki IR_s terimi yapının seri direnci üzerine düşen voltajdır.

Lineer bölge için Eşitlik (5.1) ifadesinin \ln 'i alınırsa,

$$\ell I = \ell I_0 + \frac{q}{nkT} V_D \quad (5.6)$$

şeklinde bir doğru denklemi elde edilir.

Yapının n idealite faktörü, $\ln I - V$ eğrisinin eğimlerinden ($\tan\theta=q/nkT$) yararlanılarak,

$$n = \frac{q}{kT \tan \theta} \quad (5.7)$$

eşitliği ile bulunur. I_0 doyum akımı değeri ise $\ln I - V$ grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının \ln eksenini sıfır voltajda kestiği noktadan elde edildi.

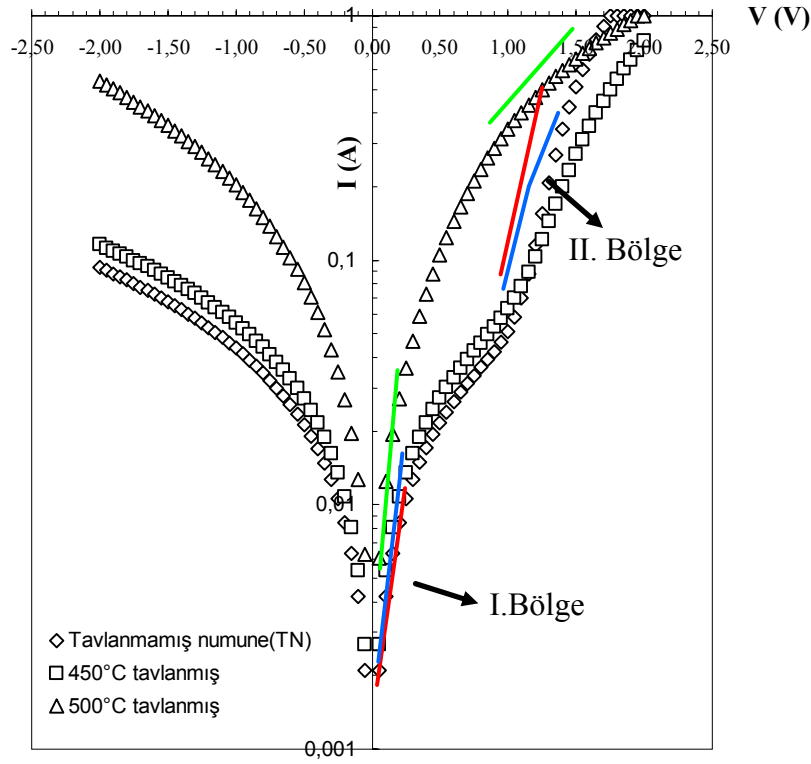
Φ_b potansiyel engel yüksekliği Eşitlik (5.2)'den çekilirse

$$\Phi_b(I - V) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (5.8)$$

eşitliği elde edilir.

5.3 Analiz Sonuçları

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısının, tavlınmamış numunenin (TN), 450°C ve 500°C'de tavlandıktan sonra yapının akım-gerilim (I-V) ölçümleri Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanılarak alındı. Bu ölçümlerden yararlanarak Şekil 5.1'de verilen yarı-logaritmik I-V grafikleri çizildi.



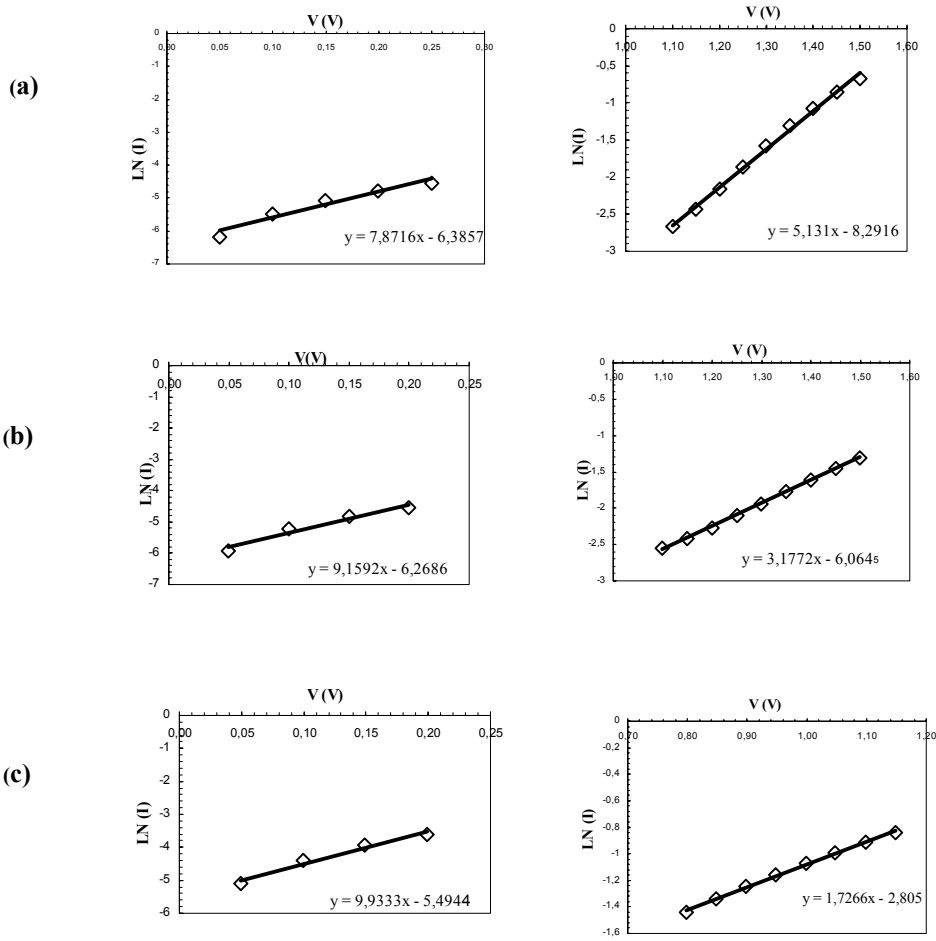
Şekil 5.1 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyotun oda sıcaklıklarında alınan yarı-logaritmik I-V grafiği

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun ileri ve ters beslemedeki yarı-logaritmik I-V karakteristikleri Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi geniş bir bölgede üstel bir değişim gösterir. Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun yarı-logaritmik I-V grafiğini incelediğinde iki lineer bölge gözlemlendi. Birinci lineer bölge Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun, diyot özelliği gösterdiği bölge olup, eklem bölgesinde oluşan elektron-deşik çiftlerinin yeniden birleşmesinden kaynaklanmaktadır. İkinci lineer bölgeyse p-n eklem diyot üzerine alınan omik kontaklardan dolayı oluşan ve istenmeyen metal-yarıiletken arasındaki engelden kaynaklanmaktadır.

p-n eklem diyotun elektriksel karakteristiklerini daha iyi irdeleyebilmek için, bu iki lineer bölgenin ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Bu nedenle, p-n eklem diyotun bu iki bölgedeki idealite faktörlerinin ve bariyer yüksekliklerinin, tavlanma öncesi

durumu ile tavlama sonrasındaki durumundaki değişimler incelenerek, elektriksel parametrelerin tavlama sıcaklığı ile nasıl bir değişim gösterdikleri incelendi.

Tavlama sonucunda, I. Bölgede bariyer yüksekliğinin ve idealite faktörünün azalması ve böylece diyot parametrelerin iyileşmesi beklenmektedir. II. Bölgede ise omik kontakta kaynaklanan bariyer değerinin azalması ve idealite faktörünün artması ve bu durumda kontakta omikliğinin iyileşmesi beklenmektedir.



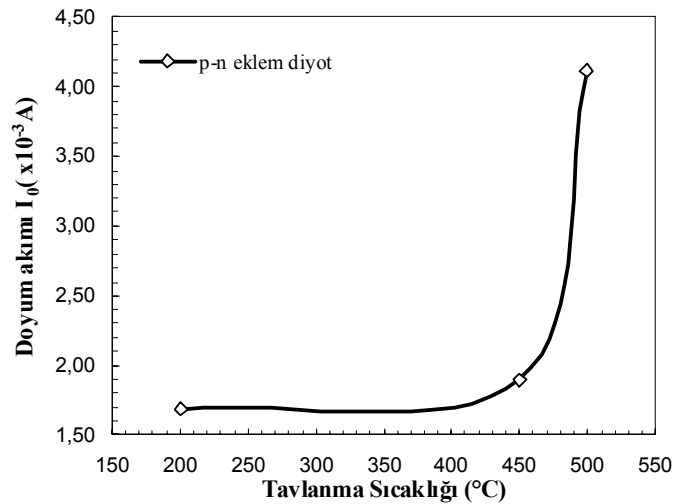
Şekil 5.2 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyotun oda sıcaklığında alınan (a) yapının tavlanaadan önceki LnI-V eğrileri, (b) 450°C de tavlanamış yapının LnI-V eğrileri, (c) 500°C de tavlanamış yapının LnI-V eğrileri

5.3.1 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n Eklem Diyota I. Bölge Analizi

Bu bölge geliştirilen diyotun, diyot özelliği gösterdiği, p-n eklem bölgesinde oluşan elektron-deşik çiftlerinin yeniden birleşmesinin gerçekleştiği en önemli bölgeyi oluşturmaktadır.

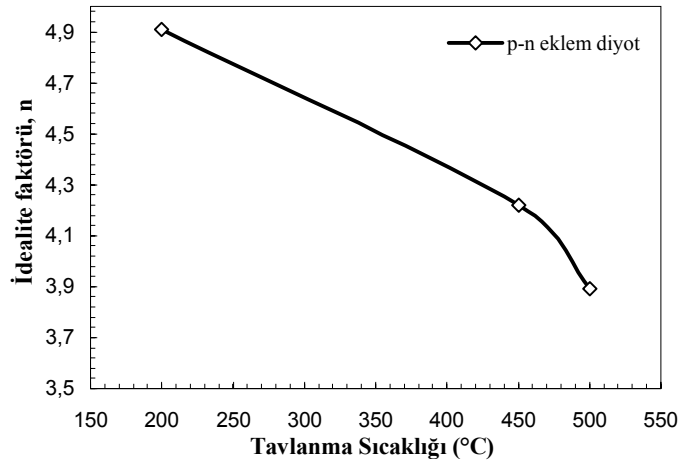
Bu bölgede tavlanma sıcaklığı arttıkça Şekil 5.2'den de görüldüğü gibi lineer bölgenin dikliğinin arttığı görülmektedir. p-n eklem diyotun eklem bölgesinde tavlanmamış numunenin (TN) eğimi $\tan\theta=7,871$ değerinden 450°C'de tavlandıktan sonra $\tan\theta=9,159$ değerine 500°C'de tavlandıktan sonrada $\tan\theta=9,933$ olmaktadır.

Bu bölgedeki geliştirilen diyotun doyum akımı Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi, TN için $I_0=1,69.10^{-3}$ A iken yapı 450°C'de tavlandığında $I_0=1,90.10^{-3}$ A ve 500°C'de tavlandıktan sonrada $I_0=4,11.10^{-3}$ A olarak hesaplandı. Bu değerler doyum akımının tavlanma sıcaklığı ile bir miktar arttığını göstermektedir. Bu durum diyot için olumlu olmamakla birlikte, tavlamanın yararlılığı için değerlendirme yapmada yeterli değildir. Bundan dolayı idealite faktöründeki değişim de dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.3 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlanma sıcaklıklarına göre doyum akımındaki değişimler

Bu bölgedeki geliştirilen diyotun idealite faktörü Şekil 5.4'den de görüldüğü gibi, TN için $n=4,909$, 450°C de tavlandıktan sonra $n=4,219$ ve yapı 500°C 'de tavlandıktan sonra ise $n=3,890$ olarak hesaplandı. Bu değerler tavlama sıcaklığı artırıldığında idealite faktörünün azaldığını bu ise tavlama sonucunda geliştirilen diyotun, diyot olma özelliğinin iyileştiğini gösterir. Bu iyileşme, yapının tavlama sonucunda yapısal kusurlarının azalmasından kaynaklanabileceği şeklinde yorumlandı.

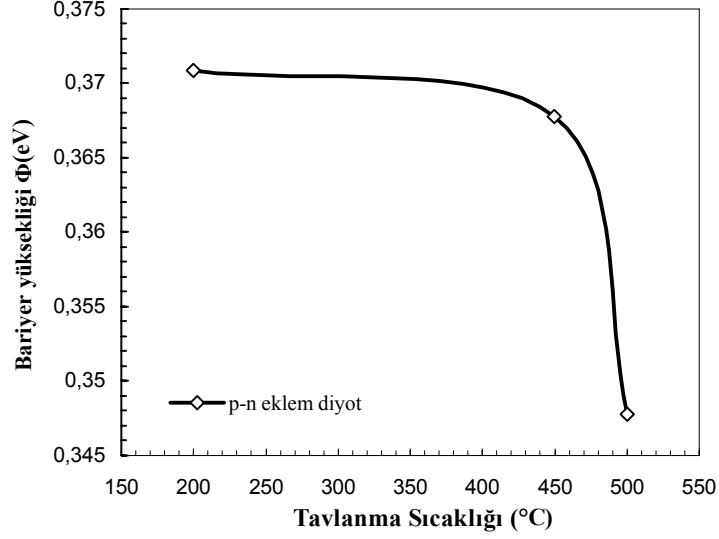


Şekil 5.4 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre idealite faktöründeki değişimler

Bu bölgedeki bariyer yüksekliklerindeki değişim ise Şekil 5.5'den de görüldüğü gibi; TN $\Phi_B=0,37$ eV'den yapı 450°C 'de tavlandıktan sonra $\Phi_B=0,36$ eV'a ve 500°C 'de tavlandıktan sonra $\Phi_B=0,347$ eV'a düşmektedir.

Tavlama sıcaklığı arttıkça GaAs_{1-x}P_x yapısında kristal kalitesinin iyileştiği, As ve P atomlarının yapıdaki yerleşiminin farklılaşmasından kaynaklanmaktadır. Yapıda oluşabilecek bu değişikliklerin eklem bölgesini daraltacağından ve böylece bariyer yüksekliğinin azalmasına neden olmaktadır. Tavlama sıcaklığının artması, kontak malzemesinin yarıiletken difüzyonunu artıracığından, bu durum bazen ilave bir katkılama gibi de etki edeceğinden bariyer yüksekliğinde farklılaşmalara neden olabilmektedir. Bariyer azalması diyot kalitesini etkileyen bir faktör olmadığı,

sadece diyotun duyarlı olduğu akım-sinyal değerinin farklılaştığı anlamına gelmektedir.



Şekil 5.5 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre bariyer yüksekliklerindeki değişimler

Tavlama sıcaklıklarına göre Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliğindeki ($\Phi_B(I-V)$) değişimler Tablo 5.1 de verildi.

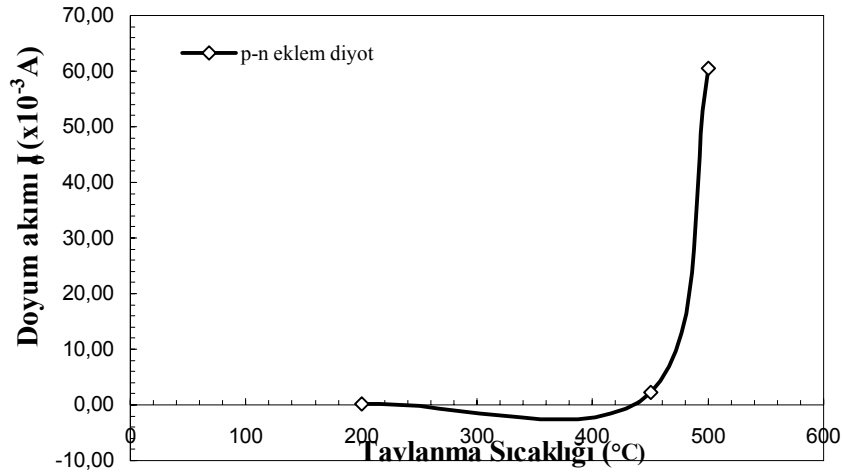
Tablo 5.1 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısının tavlama sıcaklıklarına göre I_0 , n ve Φ_b

	TN	450°C	500°C
I_0 (A)	$1,69 \times 10^{-3}$	$1,90 \times 10^{-3}$	$4,11 \times 10^{-3}$
n	4,90	4,21	3,89
Φ_b (eV)	0,370	0,367	0,347

5.3.2 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n Eklem Diyota II. Bölge Analizi

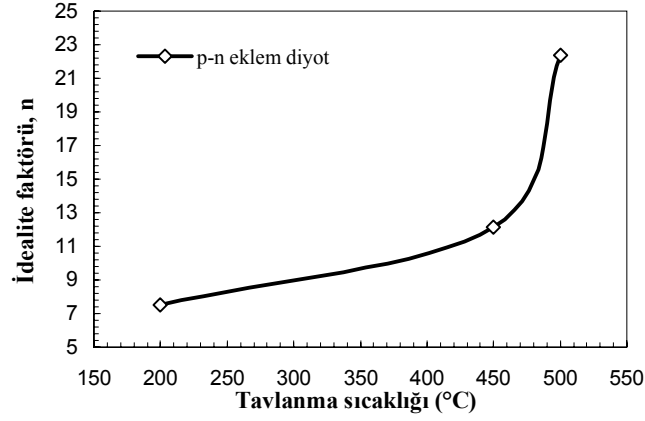
Bu bölgede tavlanma sıcaklığı artıkça Şekil 5.2'den de görüldüğü gibi lineer bölgelerin eğimi azalmaktadır. Eğim, TN için $\tan\theta=5,131$ değerinden 450°C 'de tavlandıktan sonra $\tan\theta=3,177$ ve 500°C 'de tavlandıktan sonra $\tan\theta=1,726$ olmaktadır.

Bu bölgedeki doyum akımları Şekil 5.6'den de görüldüğü gibi, TN için $I_0=0,251.10^{-3}$ A iken yapı 450°C 'de tavlandığında $I_0=2,33.10^{-3}$ A ve yapı 500°C 'de tavlandıktan sonrada $I_0=60,5.10^{-3}$ A değerine artmaktadır.



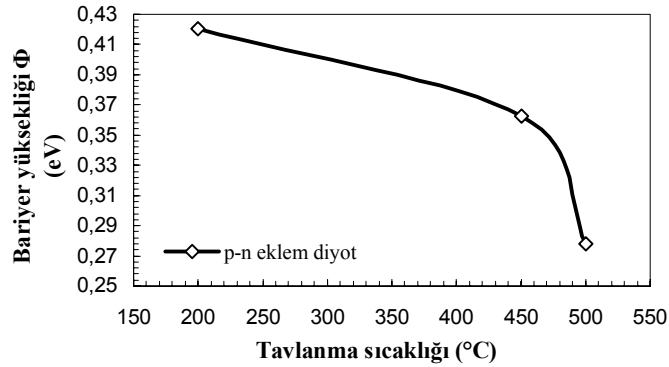
Şekil 5.6 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlanma sıcaklıklarına göre doyum akımındaki değişimler

Bu bölgede idealite faktörü Şekil 5.7'den de görüldüğü gibi, TN için $n=7,532$ iken yapı 450°C 'de tavlandıktan sonra $n=12,164$ 'e ve 500°C 'de tavlandıktan sonra $n=22,391$ olarak elde edildi. Beklenildiği gibi bu bölgede idealite faktörü artmaktadır. Bu bölgedeki idealite faktörü genel olarak I. Bölgeden yüksektir. Bu beklenen bir davranıştır. Çünkü bu bölge diyotun eklem bölgesi dışında kalmaktadır ve omik kontak ile yariletken yapı arasındaki bariyerden kaynaklanmaktadır. Bu bölgede bariyerin olmaması ya da en kötü durumda çok düşük olması beklenmektedir.



Şekil 5.7 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre idealite faktöründeki değişimler

Bu bölgedeki bariyer yüksekliği ise Şekil 5.8'den de görüldüğü gibi TN için $\Phi_B=0,420$ eV iken yapı 450°C'de tavlandıktan sonra $\Phi_B=0,362$ eV'ye ve 500°C'de tavlandıktan sonra ise $\Phi_B=0,278$ eV'ye düşmektedir. Yukarıda ifade edildiği gibi kontak-yarıiletken arasında oluşan bariyer yüksekliğinin azalması beklenen ve istenen bir sonuçtur. Buradaki bariyerin azalması ve daralması, elektronların iletiminin tünelleme ile gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu durum bu bölgede oluşan seri direncin de azalmasına neden olacağından diyot verimini ya da kalitesini artıracaktır.



Şekil 5.8 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıklarına göre bariyer yüksekliklerindeki değişimler

Al, Au, Cu, Ti kontakların tavlama sonrasında bariyer yükseklikleri azaldığından dolayı idealite faktörleri artar [24]. Geliştirdiğimiz diyot yapısına Au kontak alındı ve yukarıda belirtildiği gibi tavlama sonrasında bariyer yüksekliği azalırken buna bağlı olarak da idealite faktöründe büyük bir artış meydana geldi.

Tavlama sıcaklığı arttıkça bariyer yüksekliği düşer ve idealite faktörü artar [24]. Bunun sebebi ise farklı tavlama sıcaklıklarındaki metalin yarıiletken içerisine daha fazla difüz etmesi, kontak kalitesinin artmasıdır [24]. Kontak kalitesinin artması kontağın omikliğinin iyileşmesi anlamına gelir. Böylece akım iletimi tünelleme ile gerçekleşeceğinden kontak direnci azalır ve diyot çıktı parametreleri iyileşir.

Tavlama sıcaklıklarına göre Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem I₀, n, ve Φ_b değişimleri Tablo 5.2 de verildi.

Tablo 5.2 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısının tavlama sıcaklıklarına göre I₀, n ve Φ_b

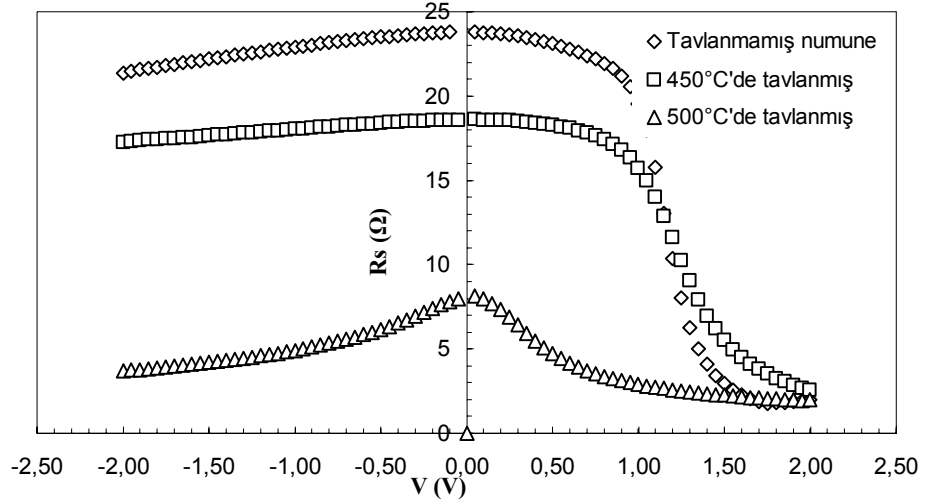
	TN	450°C	500°C
I ₀ (A)	0,25x10 ⁻³	2,33x10 ⁻³	60,5x10 ⁻³
n	7,53	12,16	22,39
Φ _b (eV)	0,420	0,362	0,278

5.4 R_s(Ω)-V(V) Eğrilerinin Karakteristiği

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs p-n eklem diyotun seri direnci hesaplanırken

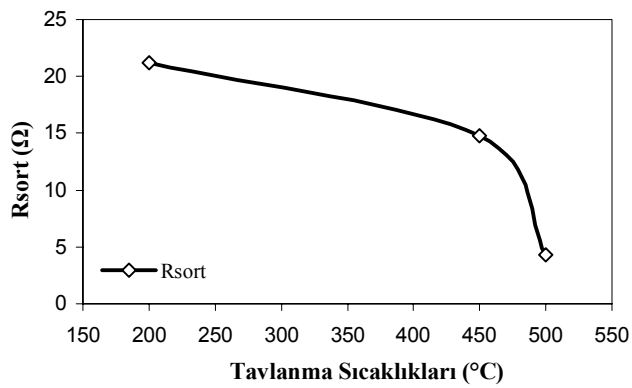
$$R_s = \frac{V}{I} \quad (1.9)$$

Ohm yasasından yararlanıldı.



Şekil 5.9 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlanmadan önceki, 450°C'de ve 500°C'de tavlanan yapının $R_s(\Omega)$ - $V(V)$ grafiği

Ohm yasasında deneyde elde ettiğimiz değerleri yazarak seri direnç değerleri hesaplanıp ortalamaları alınmıştır.



Şekil 5.10 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlanma sıcaklıklarına göre seri dirençlerin ortalaması

Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyotun tavlama sıcaklıkları artıkça Tablo 5.3'den de görüldüğü gibi seri direnç azalmıştır.

Tablo 5.3 Au/p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapısının ortalama seri dirençleri

	TN	450°C	500°C
R_{seri} (Ω)	21,23	14,76	4,29

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada MBE sisteminde büyütülen p-n eklemli GaAs_{1-x}P_x/GaAs yapısının akım-gerilim karakteristikleri incelendi. p-n eklem yapısı üzerine yüksek vakum buharlaştırma sisteminde alt ve üst altın kontaklar alındı. Kontaklara iletken teller gümüş pasta yardımıyla tutturularak yapı elektriksel özelliklerini almak için hazır hale geldi. I-V ölçümleri Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanılarak alındı. I-V ölçümlerinden yararlanılarak doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B(I-V)$) hesaplandı

p-GaAs_{1-x}P_x/n-GaAs yapılı p-n eklem diyot sırasıyla 450°C'de ve 500°C'de yüksek vakum buharlaştırma sisteminde tavlandı. Tavlanma işlemleri yapıldıktan sonra yine elektriksel özelliklerin belirlenmesi için I-V ölçümleri alındı. Bu ölçümlerden doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), ve potansiyel engel yüksekliği ($\Phi_B(I-V)$) hesaplandı. Böylece, tavlanma işleminin diyot parametrelerini ve kontakın omikliğini nasıl etkilediği incelendi. Tavlanma öncesinde ve tavlanma sonrasındaki I-V grafikleri incelendiğinde; biri eklem bölgesine diğeri ise kontak bölgesine ait farklı eğimli iki lineer bölge gözlemlendi. Bu iki lineer bölge I. Bölge ve II. Bölge olarak ayrı ayrı incelenerek eklem bölgesinin elektriksel parametreleri ve kontak engelindeki değişimler değerlendirildi.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

1) I. Bölgede tavlanma sıcaklığı arttıkça I-V eğimleri dikleşmesinden dolayı idealite faktöründe bir azalma meydana geldi. İdealite faktörünün azalması geliştirilen diyotun, diyot özelliğinin iyileştiğini gösterir.

2) I. Bölgede tavlama sıcaklığı artıkça $GaAs_{1-x}P_x$ yapısında kristal kalitesinin iyileştiği, As ve P atomlarının yapıdaki yerleşiminin farklılaşmasından dolayı bariyer yüksekliğinde bir azalma meydana gelir. Bariyer yüksekliğindeki azalma diyot parametrelerini etkilemez ancak diyotun duyarlı olduğu akım-sinyal değerinin farklılaştığı anlamına gelir.

3) II. Bölgede tavlama sıcaklığı artıkça I-V eğimlerindeki diklik çok fazla azaldığı için idealite faktörünün değeri artmaktadır. Bu artışın çok olmasının sebebi, bu bölgenin diyot bölgesi dışında kalmasıdır. Bundan dolayı bu bölge omik kontak ile yarıiletken yapı arasındaki bariyerden kaynaklandığından idealite faktörünün bu bölgede yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur.

4) II. Bölgede tavlama sıcaklığı artıkça bariyer yüksekliğinde azalma meydana gelir. Bu bölgedeki idealite faktörü artarken bariyer yüksekliğinin azalması kontak kalitesinin artması anlamına gelir ve böylece kontak omikliği artar. Bu durumda akım iletimi tünelleme ile gerçekleşeceğinden kontak direnci azalır ve diyot çıktı parametreleri iyileşir.

5) Tavlama sıcaklığı artıkça bariyer yüksekliği azaldığından doyum akımı artar. Doyum akımındaki artış seri direncin azalmasına neden olur. Bizim diyot yapımızda, özellikle $500^{\circ}C$ 'de tavllanmış diyotta, bu azalma gerçekleşmiştir.

Bu çalışma sonucunda I ve II. Bölge olarak iki kısımda incelenen diyotun elektriksel parametrelerinin analizleri, $500^{\circ}C$ 'de tavllanmış diyotun, kontak özellikleri iyileştikten, tavlama sıcaklığının diyot parametrelerini iyileştirdiği gözlemlendi.

7.KAYNAKLAR

- [1] Holt D. B., Yacobi B.G., Extended Defects In Semiconductors, Cambridge University Pres, (2007), p.1
- [2] Sze S.M., Semiconductor Devices, John Wiley&Sons, New York, (2002), p. 18, 60, 112, 235 .
- [3] Hook J. R. & Hall H.E., Katıhal Fiziği, Prof. Dr. Köksal F., Prof. Dr. Altunbaş M., Prof. Dr. Dinçer M., Yrd.Doç.Dr. Başaran E., 28, Literatür Yayınları, Nobel Matbaacılık Ltd.Şti., (2006), 169, 176.
- [4] Seeger K., Semiconductor Physic An Introduction, vol. 40, Springer, Germany, (1999), 2.
- [5] Beiser A., Modern Fiziğin Kavramları, Öngüt G., Akyüz Ö., McGraw-Hill-Akademi ortak yayını, İstanbul, (1997) 334.
- [6] Türköz M.S., Elektronik Devreleri I, cilt 1, Birsen Yayınevi Ltd.Şti., İstanbul, (1999), 5, 6, 57,59.
- [7] Beicher S., Modern Fizik Fen ve Mühendislik için, Pr. Dr. Çolakoğlu K., 3.Cilt, Palme Yayıncılık Ankara, (1996) 1272.
- [8] Streetman B.G.and Banerjee S., Solid State Electronic Devices, (1967) p. 67, 92, 211, 212, 214, 217, 218,.
- [9] Anderson B. L., Anderson R. L., Fundamentals of Semiconductor Devices, Paulson C., The McGraw-Hill Companies, (2005) p.17,59.

[10] Wilson J., Hawkes J. F. B., Optoelektronik, Okur İ., Değişim Yayınları, İkinci baskı, Adapazarı, (2000) 50, 53.

[11] Prof. Dr. Abukay D., Prof. Aral E., Prof. Dr. Işın A., Prof. Kılınçkaya M. S., Prof. Dr. Öngüt G., Prof. Dr. Özel M.E., Prof. Dr. Ülkü D., Prof. Dr. Veziroğlu N., Prof. Dr. Zor M., Yrd.Doç. Dr. Yörükoğulları E., Yrd.Doç. Dr. Şenel M., Modern Fizik Prof. Dr. Zor M., Anadolu Üniversitesi, Etam A.Ş. Web-Ofset tesisleri, (1991) 123, 124, 128,133.

[12] Achuthan M.K., Bhat K. N., Fundamentals of Semiconductor Devices, The McGraw-Hill Companies, (2008) 42, 45, 131, 132, 133.

[13] Parker G., Introductory Semiconductor Device Physics, Redwood Books, Trowbridge, (1994) p. 51.

[14] Büget U., PN Ekleme kristal diyot ve tranzistörler, 8, Meteksan Yayınları, Meteksan Matbaacılık ve Teknik sanayi Ticaret Limited Şirketi, (1983), 25, 39.

[15] Zhang Q., Sudarshan T. S. “Forward characteristics of P^+PN^+ and P^+NN^+ diodes on 6H-SiC”, Solid-State Electronics, 45 (2001) 1559.

[16] Bhattacharya P., Semiconductor Optoelectronic Devices, Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster/AViacom Company Upper Saddle River, New Jersey 07458 (1997), p. 158, 165.

[17] Neamen D. A., Semiconductor Physics & Devices, Basic Principles, Isenberg S., Butcher K., The McGraw-Hill Companies, (1997) p.212, 214, 216, 266, 267, 268.

[18] Skromme B. J., “Junction and Barriers”, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, (2008), p.1.

[19] Jin He, Ming Fang, Bo Li, Yu Cao, “A new analytic approximation to general diode equation”, Solid-State Electronics, 50 (2006) 1371.

- [20] Yann Jiun Maa, Ibrahim M., Abdel-Motaleb, “Analysis of the diode characteristics using the thermodynamic theories”, *Solid-State Electronics*, 46, (2002) 735.
- [21] Kavaşoglu N., Kavaşoglu A. S., Oktik Ş., “A new method of diode ideality factor extraction from dark I–V curve” *Current Applied Physics*, 9, (2009) 833.
- [22] Lee C. C., Chen W., V., Park J., “A new I–V model for light-emitting devices with a quantum well”, *Microelectronics Journal*, 37 (2006) 1335.
- [23] Qian Feng, Li-Mei Li, Yue Hao, Jin-Yu Ni, Jin-Cheng Zhang, “The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGa_N/Ga_N HEMT by multi-step annealing method”, *Solid-State Electronics*, 53, (2009) 955.
- [25] Zhang D.H.: “Metal contacts to n-type AlGaAs grown by molecular beam epitaxy”, *Materials Science and Engineering*, B60, (1999), 189.