

**$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ (100) NANOYAPISININ BÜYÜTÜLMESİ VE I-V
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Hilal GÜMÜŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2005
ANKARA**

Hilal GÜMÜŞ tarafından hazırlanan $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ (100) NANOYAPISININ BÜYÜTÜLMESİ VE I-V ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr.Süleyman ÖZÇELİK
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs (100) NANOYAPISININ BÜYÜTÜLMESİ VE I-V ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hilal GÜMÜŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2005

ÖZET

Bu çalışmada SEMİCON VG80H Moleküler Demet Epitaxy (MBE) cihazı kullanılarak Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs süperörgü diyot yapısı büyütüldü. Büyütülen Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs süperörgü diyot yapısının yapısal analizi yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı yöntemi (HRXRD) ile yapıldı. Rocking ve reflectivity ölçümleri D8 discover X-ray cihazı kullanılarak yapıldı. X-ışını cihazında ölçülen rocking eğrileri hem kinematik hem de dinamik metotları kullanan LEPTOS programı ile simule edildi. Elde edilen Rocking eğrilerindeki uydu piklerinin varlığı büyütülen epitabakaların yeterli incelikte ve homojenlikte olduğunu kanıtlamaktadır. Büyütülen Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs süperörgü yapısının elektriksel karakteristiklerinin incelenebilmesi için Au/GaAs kontak yapıldı. Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs yapısının akım-voltaj-sıcaklık (I-V-T) karakteristikleri geniş bir sıcaklık aralığında (80 K- 400 K) incelendi.

Bilim Kodu : 404.05.01
Anahtar Kelimeler : MBE, Al_xGa_{1-x}As/GaAs, elektriksel karakterizasyon, yapısal karakterizasyon, I-V
Sayfa Adedi : 100
Tez Yöneticisi : Prof. Dr.Süleyman ÖZÇELİK

THE GROWTH OF $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ (100) NANOSTRUCTURE AND THE INVESTIGATION OF I-V PROPERTIES

(M.Sc. Thesis)

Hilal GUMUS

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Eylül 2005

ABSTRACT

In this work, a $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice diode structure has been grown with SEMİCON VG80H Molecular Beam Epitaxy (MBE) device. The structural analysis of the $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice diode structure were made by high-resolution X-ray diffraction (HRXRD). The Rocking and reflectivity scans measured by D8 discover X-ray device on (002) symmetric reflection of substrate have been simulated using LEPTOS program within the framework of dynamic and kinematical theories. The presence of the satellite peaks in the obtained Rocking curves proved that the growth epilayers have enough thickness and homogeneity. For the investigation of the electrical characteristics of the growth $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice diode structure, the Au/GaAs contact were formed. The forward bias current-voltage-temperature (I-V-T) characteristics of Au/ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ structures are studied over a wide temperature range between 80 K and 400 K.

Science Code	: 404.05.01
Key Words	: MBE, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, electrical characterization, structural characterization, I-V
Page Number	: 100
Adviser	: Prof. Dr. Suleyman OZCELIK

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu tez çalışmasında benden yardımlarını esirgemeyen, her konuda bilgisinden faydalanabildiğim danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Süleyman Özçelik'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmamın her aşamasında bulunan ve bana her anlamda destek veren, deneylerimin yapılmasında büyük kolaylık sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Tofig MAMMADOV'a, çalışmalarımın elektriksel karakterizasyon bölümünde yapmış olduğu yardım ve destekten ötürü hocam Yrd. Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, yapısal analiz kısmında yapmış olduğu yardımlardan dolayı hocam Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e, metal/yarıiletken kontakların yapılmasında, yüzey temizleme aşamasında ve deneylerin yapılmasında bana yardımcı olan arkadaşlarım Beyza SARIKAVAK ve Aylin BENĞİ'ye, ayrıca Gazi Üniversitesi STARLAB'ta büyük bir özveri ile çalışan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Manevi desteklerinden dolayı canım arkadaşlarım Sevgi DAĞKUŞ, Aybüke AKSUNGUR, Deniz TOPRAK ve Sezgin AYDIN'a çok teşekkür ederim. Bu çalışmayı yapabilmem için bana her türlü desteği sağlayan değerli hocalarım Nesibe AYDIN, Fatih ACAR ve NESİBE AYDIN EĞİTİM KURUMLARINDA çalışan bütün öğretmen arkadaşlarıma teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen yaptığım her işte arkamda olan canımdan çok sevdiğim anneme, babama ve abime çok teşekkür ederim.

2001K120590 kodlu “İleri Araştırma ve Eğitim Programları” ve 2003K120470-15 kodlu “Tabakalı (InGaAs, AlGaAs ve InGaN)/GaAs Yarıiletken İnce Filmlerin Geliştirilmesi ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi” projelerine verdiği desteklerinden dolayı Devlet Planlama Teşkilatına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKENLER	5
2.1. Enerji Bant Teorisi	5
2.2. Yarıiletken Tipleri	10
2.3. Fermi Enerjisi	15
3. YARIİLETKEN ALAŞIMLAR	17
3.1. Kuantum Kuyuları	18
3.1.1. Süperörgüler	19
3.2. Düşük Boyutlu Yarıiletkenler	22
3.3. Al, Ga ve As'ın Peryodik Cetveldeki Yeri ve Özellikleri	24
3.4. GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın $T=300\text{ K}$ 'deki Fiziksel Parametreleri	26
3.4.1. GaAs'ın $T=300\text{ K}$ 'deki fiziksel parametreleri	26
3.4.2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 'ın bant yapısı	28
3.4.3. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın $T=300\text{ K}$ 'deki fiziksel parametreleri	29

	Sayfa
4. EPİTAKSİYEL BÜYÜTME	30
4.1. Moleküler Demet Epitaksi(MBE).....	30
4.1.1. Yüksek vakumlu ortamdaki ışınlardan ince film büyütülmesi	30
4.2. V80H-10 MBE Sistemi.....	32
4.2.1. MBE vakum odasındaki fiziksel olaylar	42
4.3. Büyütme İşlemine Başlanması.....	44
4.3.1. Alttaşın büyütme işlemine hazırlanması	44
4.3.2. GaAs tabakasının MBE’de büyütülmesi	46
4.3.3. Akı kalibrasyonu	50
4.3.4. AlAs ve AlGaAs büyütülmesi.....	54
5. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON.....	55
5.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	55
5.2. Schottky-Mott Teorisi	56
5.2.1. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ($\Phi_s > \Phi_m$)	58
5.2.2. Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontak ($\Phi_s < \Phi_m$)	61
5.2.3. Yüzey durumları ve yalıtkan bir arayüzey tabakasına sahip olan kontaklar.....	62
5.3. Schottky Etkisi (hayali kuvvet engel alçalması)	64
5.4. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları	66
5.4.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE).....	67
5.5. Schottky Diyodlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri	68
6. DENEYSEL SONUÇLAR	70
6.1. Moleküler Demet Epitaksi Metodu ile $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ Yapısının Büyütülmesi	70

Sayfa

6.2. Büyütülen $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SL Yapısının Islak Aşındırması	73
6.3. Metal-Yarıiletken (MS) Ohmik ve Doğrultucu Kontakların Oluşturulması	75
6.3.1. Ohmik kontağın oluşturulması	75
6.3.2. Doğrultucu kontağın oluşturulması	75
6.4. Ölçme ve Değerlendirme İşlemleri	76
6.4.1. X-ışınları karakterizasyonu	76
6.4.2. I-V ölçümleri	79
7. SONUÇ	96
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı elementsel, ikili, üçlü ve dörtlü bileşik yarıiletkenler	13
Çizelge 2.2. Tipik yarıiletkenlerin yasak bant aralığı. Burada d=direkt bant, i=indirekt banttır(25).....	15
Çizelge 3.1. Al, Ga ve As'in özellikleri(31)	25
Çizelge 3.2. Oda sıcaklığında GaAs'a ait bazı fiziksel parametreleri(26, 32, 33).26	26
Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında $Al_xGa_{1-x}As$ 'a ait bazı fiziksel parametreler(32-37)29	29
Çizelge 4.1. Potasız ve potalı hücre maksimum çalışma sıcaklıkları	46
Çizelge 6.1. GaAs ve AlGaAs ıslak aşındırması için kullanılan kimyasal solüsyonlar	74
Çizelge 6.2. MBE ile büyütülen $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ yapısının X-Işını karakterizasyonu sonucunda, ara yüzeylerin normal ve bileşik yüzdesi ölçülen kütle yoğunlukları, tabaka kalınlıkları ve Al verileri.....	78
Çizelge 6.3. $Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs$ Schottky diyot için 80K-400K sıcaklık aralığında elde edilen deneysel parametreler	81
Çizelge 6.4. $Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs$ yapısı için doğru beslem I-V karakteristiğinden 80K-400K sıcaklık aralığında elde edilen deneysel veriler.....	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sodyum atomuna ait elektron enerji seviyeleri diyagramı	5
Şekil 2.2. 4 Sodyum atomunun biraraya gelmesi halinde elektron enerji seviyeleri diyagramı	6
Şekil 2.3. Bir katının valans ve iletkenlik bantlarının temsili gösterimi.....	8
Şekil 2.4. İletken, yalıtkan ve yarıiletkenin enerji bantlarının şematik gösterimi: (a) kısmen dolu değerlik bantıyla bir metal, (tek değerlikli metaller), (b) iki üst üste gelmiş kısmen dolu bantlı bir metal, (iki değerlikli metaller), (c) bir yalıtkan, (d) bir doğal yarıiletken. Taralı yerler dolu elektron seviyelerini gösterir (24)	9
Şekil 2.5. Metal yarıiletken ve yalıtkanlar için iletkenlik aralığı.....	9
Şekil 2.6. n ve p tipi yarıiletkenlerin enerji seviye diyagramları	10
Şekil 2.7. n-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi. (a) bir silikon atomunun bir fosfor safsızlık atomu ile yerdeğiştirdiği kristal örgü (b) donör safsızlık atomlarının enerji seviyeleri (bu diyagram bazı iletkenlik bandına bir elektron bıraktığını göstermektedir).....	11
Şekil 2.8. p-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi. (a) üç değerlikli safsızlıkla (mesela bor) beraber kristal örgüsü (b) alıcı safsızlık atomlarının enerji seviyeleri (bazı safsızlıklar değerlik bandından elektronları almışlardır (24).....	12
Şekil 2.9. (a)İndirek ve (b)direk bant aralığı.....	14
Şekil 2.10. Fermi faktörünün enerji ile değişimi	15
Şekil 2.11. Saf ve saf olmayan yarıiletkenlerde Fermi enerjisinin konumu	16
Şekil 3.1. III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı- örgü parametresi değişimi. Katı çizgiler direkt bant aralığını ve kesikli çizgiler ise indirekt bant aralığını göstermektedir(28).....	17
Şekil 3.2. Basit bir heteroyapıda oluşan kuyu sistemi	18
Şekil 3.3. Bir süperörgüdeki bant yapısının grafiği	19
Şekil 3.4. Mümkün olan iki bant durumu	20

Sayfa

Şekil 3.5. II. Tip süperörgüler	21
Şekil 3.6. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kuantum kuyusu yapısının şematik olarak gösterimi. (a) Çok ince, dar band aralıklı bir GaAs aktif tabakası, iki kalın ve daha geniş band aralıklı $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakaları arasına sandviçlenmiştir. (b) Elektronlar sonlu bir kare kuyu potansiyeli ile ince GaAs tabakasında tuzaklanmaktadır.....	22
Şekil 3.7. Periyodik cetvel(31).....	24
Şekil 3.8. GaAs kristal yapısı (çinko sülfür kristal yapısında)(26)	27
Şekil 3.9. GaAs için faz diyagramı (26).....	27
Şekil 3.10. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi. $E_{g\Gamma}$ Γ noktasındaki direkt geçişi ve E_L ve E_X sırasıyla Brillouin bölgesindeki X ve L noktalarındaki İndirekt geçişi göstermektedir(28)	28
Şekil 4.1. VG80H MBE modeli(42)	34
Şekil 4.2. MBE 'de ultra yüksek vakum ortamının modellenmesi(43).....	35
Şekil 4.3. Tipik bir büyütme odası ve burada yer alan elemanlar.....	37
Şekil 4.4. Moleküler Demet Epitaksi prensibi; 1.Altaş rotasyonu, 2.Isıtılmış alttaş, 3.Yumuşak hareketli kapak, 4.Moleküler demet kaynağı, 5. Kapak (kesici) ile bloke edilen demet.....	37
Şekil 4.5. STARLAB'ta kullanılan K-Hücre dizilimi.....	38
Şekil 4.6. RHEED elektron demetlerinin örnek üzerinde kırıldıktan sonra floresan ekran üzerine düşmesi	39
Şekil 4.7. RHEED desenleri ve osilasyon.....	41
Şekil 4.8. Monotabaka büyütülmesi sırasında RHEED sinyali	41
Şekil 4.9. MBE büyütme odasında fiziksel olayların meydana geldiği bölgeler...	43
Şekil 4.10. MBE büyütmesi sırasında meydana gelen yüzey işlemleri	43
Şekil 4.11. GaAs için alttaş sıcaklığına göre büyüme hızının değişimi: 1. AlAs, 2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ içindeki GaAs kısmı , 3. GaAs(49).....	47

Sayfa

Şekil 4.12. (a) Ga ve As ₂ 'den, ve (b) Ga ve As ₄ 'ten GaAs büyütülmesi	49
Şekil 4.13. III-V grubundaki bazı elementlerin Sıcaklık – Buhar Basıncı değişimi	51
Şekil 4.14. (a) As ₁ için, (b) As ₂ için, (c) Ga için, (d) In için Sıcaklık – Basınç eğrisi	53
Şekil 5.1. Metal ve yarıiletkenin kontak yapılmadan önce, Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları	56
Şekil 5.2. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta($\Phi_m > \Phi_s$) ısısal dengedeki enerji –bant diyagramı.....	57
Şekil 5.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ($\Phi_s > \Phi_m$) enerji bant diyagramı. (a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı. (b) Kontak oluşuktan sonraki temel denge durumu	59
Şekil 5.4. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak (a) kontak yapıldıktan sonra (termal dengede), (b) doğru beslem ve (c) ters beslem enerji-bant diyagramı.....	60
Şekil 5.5. Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontak için (a) kontak oluşmadan önce (b) kontak oluşuktan sonra termal denge, (c) doğru beslem ve (d) ters beslem altında enerji bant diyagramı	62
Şekil 5.6. Arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakasına sahip metal-yarıiletken kontak (a) kontak yapılmadan önce ve (b) kontak yapıldıktan sonra enerji-bant diyagramı	64
Şekil 5.7. Dış bir gerilim altında metal/n-tipi yarıiletken için Schottky engel alçalmasındaki değişim	64
Şekil 5.8. (a) Elektron ile metaldeki görüntü yükün şematik diyagramı ve (b) dış bir alan yokken potansiyel engel alçalması	65
Şekil 5.9. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c)Uzay yük bölgesinde birleşme, (d)doğal bölgede deşik enjeksiyonu	67
Şekil 6.1. Al _{0.2} Ga _{0.8} As/GaAs SL diyot yapısı	72

Sayfa

Şekil 6.2. Büyütme işlemi sırasındaki Ga, Al, As, Si akıları ve Al konsantrasyonun sıcaklıkla değişimi.....	72
Şekil 6.3. Kontaklar için kullanılan maskeler: (a) Ohmik, (b) Doğrultucu kontak.	75
Şekil 6.4. Ohmik ve doğrultucu kontaklar oluşturulduktan sonra Au/ Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısının şematik diyagramı; malzemenin üst kısmı doğrultucu kontağı alt kısmı ise ohmik kontağı göstermektedir.....	76
Şekil 6.5. Al _{0,2} Ga _{0,8} As/GaAs MQW diyot için GaAs(002) yansıması civarındaki Rocking eğrisi: mavi renk tarama değerleri ve kırmızı renk ise simülasyonu (teorik)gösterir	77
Şekil 6.6. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısının deneysel doğru beslem akım-gerilim karakteristikleri	80
Şekil 6.7. Sıfır beslem bariyer yüksekliğinin 1000/T ile değişimi.....	82
Şekil 6.8. Diyot idealite faktörünün 1000/T ile değişimi.....	82
Şekil 6.9. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısı için sıcaklığa karşı $\Phi_{Bo}(I-V)$ değişimi.....	83
Şekil 6.10. $(E_{ss}-E_v)$ 'nin fonksiyonu olarak arayüzey durumlarının sıcaklığa bağımlı yoğunluk dağılım profili	84
Şekil 6.11. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapı için $dV/d(\ln I)$ 'ya karşı I grafiği	86
Şekil 6.12. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısı için H(I)-I grafiği	87
Şekil 6.13. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısı için 100 kHz frekansında farklı sıcaklıklar için $C^{-2}-V$ grafiği	89
Şekil 6.14. Au/Al _{0,2} Ga _{0,8} As/p-GaAs yapısı için farklı sıcaklıklarda gerilime bağımlı seri direnç grafiği	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Gazi Üniversitesi STARLAB’da bulunan VG80H MBE modeli.....	33
Resim 4.2. 3-inch indiyumsuz alttaş tutucu: 1. alttaş ve 2. alttaş tutucu.....	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A^*	Etkin Richardson sabiti
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
A	Diyotun etkin alanı
$C-V$	Kapasitans-gerilim ölçümleri
C_{ma}	Güçlü akümülyasyonda ölçülen kapasitans
E_c	İletkenlik bant kıyısı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_{Fs}	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E_{Fm}	Metalin Fermi seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_i	Saf yarıiletkenler için Fermi seviyesi
E_{ss}	Arayüzey durumlarının enerjisi
E_v	Valans bant kıyısı enerjisi
ϵ_d	Hayali kuvvetlerin dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
f_c	Kritik frekans
$F(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
$I-V$	Akım-gerilim ölçümleri
J_{sm}	Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu
J_o	Doyum akım yoğunluğu
$\vec{k}$	Dalga vektörü
k	Boltzman sabiti
L_n	Elektronların p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu

Simgeler**Açıklama**

L_p	Deşiklerin p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu
m^*	Yarıiletkenin etkin kütlesi
m_{hh}	GaAs için ağır deşik etkin kütlesi
m_{lh}	GaAs için hafif deşik etkin kütlesi
m_e/m_o	Elektron etkin kütlesi
$m_{p,h}$	$Al_xGa_{1-x}As$ için ağır deşik etkin kütlesi
$m_{p,l}$	$Al_xGa_{1-x}As$ için hafif deşik kütlesi
M	Molekül ağırlığı
n	Diyot idealite faktörü
n	Birim hacimdeki elektron sayısı
n_i	Saf taşıyıcı yoğunluğu
n_n	n-tarafında çoğunluk taşıyıcıların sayısı
N_A	Akseptör (alıcı) konsantrasyonu
N_A	Avagadro sayısı
N_c	İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_D	Donor (verici) konsantrasyonu
$N(E)$	Bandlardaki durum yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu
p	Birim hacimdeki deşik sayısı
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık (K)
T_s	Büyütme sıcaklığı
$U_T(x)$	Toplam potansiyel enerjisi
V_D	Engel tabakası boyunca gerilim düşmesi
V_F	Doğru beslem gerilimi
V_i	Eklem (kontak) potansiyel farkı
V_R	Ters beslem gerilimi
W	Tüketim bölgesi genişliği

Simgeler**Açıklama**

w	Foton frekansı
Γ	Gama noktası
Φ_B	Elektronlar için potansiyel engel yüksekliği
Φ_B'	Deşikler için potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem engel yüksekliği
$\Phi_B(T)$	Düzeltilmiş potansiyel engel yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\Delta\Phi_B$	Potansiyel engel alçalması
α	Engelin sıcaklıkla değişim katsayısı
Ω	Fonon frekansı
δ	Oksit tabakasının kalınlığı
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
σ_s	Standart sapma

Kısaltmalar**Açıklama**

AC	Alternatif akım
AE	Alan Emisyonu
DC	Doğru akım
DOS	Durum yoğunluğu
FEL	Hızlı giriş kilidi
HEMT	Yüksek mobiliteli tranzistör
HRXRD	Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı
LED	Işık yayan diyot
LPE	Sıvı Faz Epitaksi
MBE	Moleküler demet epitaksi

Kısaltmalar**Açıklama****MIG**

Gözetim iyon ölçeri

MS

Metal-yarıiletken

RHEED

Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı

STARLAB

Yarıiletken ileri araştırma laboratuvarı

UHV

Ultra yüksek vakum

TAE

Termiyonik Alan Emisyonu

TE

Termiyonik Emisyon Teorisi

TED

Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi

QMS

4-kutuplu kütle spektrometresi

1. GİRİŞ

1940'ların sonlarına doğru ortaya çıkan yarıiletken malzemeler elektronik endüstrisinde çok önemli değişikliklere neden olmuştur. Gerçekleşen minyatürleşme ile daha önceki devrelerin tek bir elemanından binlerce kat daha küçük bir pul üzerine şimdi komple sistemler yerleştirilebilmektedir. Yarıiletken sistemler daha küçük ve hafif olmaları, ısıtıcıdan kaynaklanan kayıpların olmaması, daha sert yapıda olmaları, daha verimli olmaları ve ısınma sürelerine gerek duymamaları gibi özellikleri nedeniyle tercih edilirler (1). Doğada en iyi bilinen elementer yarıiletken malzemeler mikrochip üretiminde kullanılan germanyum (Ge) ve silikondur (Si). Bunun yanı sıra galyum-arsenik (GaAs) gibi ikili, AlGaAs gibi üçlü ve InGaAlAs gibi dördü alaşımlar da elektronik ve opto-elektronik cihazların üretiminde temel elemanlardır. Ancak bu yarıiletkenleri doğada saf olarak bulmak mümkün değildir. Bunlar yapay olarak yüksek teknoloji sistemlerle üretilmektedir. Bunlardan birkaçı; buhar faz epitaksi (VPE), sıvı faz epitaksi (LPE), kimyasal buhar birikimi (CVD), MOCVD ve MBE'dir. Yapay büyütme tekniklerinden en etkin olanı "moleküler demet kullanarak kristal büyütme" (*Molecular Beam Epitaxy* (MBE)), hem araştırma, hem de endüstriyel amaçlı kullanılabilecek yüksek kaliteli yarıiletken malzemelerin üretilmesinde kullanışlı ve güvenli bir metottur. Ülkemizde bir ilk olarak Gazi Üniversitesi Yarıiletken İleri Araştırma laboratuvarında "Molecular Beam Epitaxy" kristal büyütme sistemi kurulmuştur (2).

Moleküler Demet Epitaksi(MBE) yönteminde molekül demetleri kullanılarak, tek kristal alttaş üzerinde, alttaşın yönelimini tekrarlayarak, düzgün sıralanmış tek kristal tabakalar büyütülür. MBE tekniği, kristal büyütme teknikleri içerisinde en mükemmeldir. MBE'nin diğer yöntemlerden farkı, büyütme işleminin çok daha temiz koşullarda gerçekleşmesi, ultra yüksek vakuma ulaşılabilmesi (10^{-10} - 10^{-11} mbar), demet akılarının (büyüme oranlarının) ve alttaş sıcaklığının kontrol edilebilmesidir. Monotabaka boyutunda büyüme kontrolüne sahiptir. Böylece ultra yüksek vakum altında, belirgin arayüzeylere sahip $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ gibi farklı yarıiletken malzemeleri tabaka tabaka üretilir ve tabakaların katkılanması kontrol edilebilir. MBE ile gelişmiş optoelektronik cihazlar , yüksek mobiliteli

transistörler (HEMT), injeksiyon lazerler, LEDler gibi yüksek kaliteli bileşik yarıiletkenler büyütülebilir (2).

1970’li yıllar ve sonrasında, yarıiletken heteroyapılar üzerine yapılan çalışmalarda artış gözlenmiştir. Çalışmalar daha kaliteli yarıiletken malzemeleri üretme yollarında odaklanmıştır(1). Çoklu tabakalı, çoklu bileşenli, mükemmel arayüzeylere sahip, tek kristal, örgü uyumlu yarıiletken yapılarına “heteroeklem” denilmektedir (3,4). Heteroeklem yapısından farklı olan “heteroyapı” terimi ise ilk defa 1969 yılında $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ tekli heteroyapılı lazerin açıklanması için kullanılmıştır. Bu lazerlerden en basit olanının heteroyapısı; GaAs alttaş üzerinde büyütülmüş, zıt katkılanmış iki tane $Al_xGa_{1-x}As$ tabakanın arasına yaklaşık 1000 Å kalınlıklı GaAs tabaka şeklindedir. Bu yapı, tek kristalin çoklu tabaka bölgesinde, bant aralığının kontrollü değişimine izin vererek ışığın, deşiklerin ve elektronların kontrolüne izin verir. Bu yapı Sıvı Faz Epitaksi (LPE) metodu ile üretilmiştir. Üretilen bu heteroyapının başarısı, ince tek kristal yarıiletken yapıları incelemek ve yeni cihazların geliştirilmesi için teşvik edici olmuştur(5).

Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği ilk defa, Bell Laboratuvarlarındaki heteroyapılı lazerler üzerinde çalışan bir grup tarafından fark edildi. 1970’lerin başındaki heteroyapılı malzemeler ve araçlar ile ilgili olan bu ilk araştırmalar, heteroyapıların gelişimi için bir başlangıç modeli oldu. 1978’de elementsel olmayan kaynakların kullanımı yine bu laboratuvarlarda geliştirilerek, Gaz Kaynaklı Moleküler Demet Epitaksi (GSMBE) metodu geliştirildi. MBE tekniğiyle III-V grubu yarıiletken bileşiklerinin vakumda büyütmesi ile ilgili birçok önemli gelişme vardır. 1958 yılında, Günther III-V grubu yarıiletken bileşiklerinin vakum ortamında büyütülebileceğini göstermek için ısıtılmış duvarlara sahip bir vakum sistemi kullandı(6). Bu yöntemde vakum sisteminin duvarları gerekli As basıncını korumak için yeterli yükseklikteki sıcaklıkta (150 °C) tutulur. Ga’un ve As ‘nin alttaşın görüş hattındaki ufak bir kaptaki ısıtılması ile alttaşdaki Ga ve As akısı oluşur. Buradaki ısı kaynakları efüzyon hücrelerinin ilk halleridir. 1968 yılında Davey ve Pankey vakum koşulları geliştirip, duvar yaklaşımını değiştirerek epitaksiyel tabakaların büyütülebileceğini gösterdiler(7). Aynı dönemde Arthur ultra yüksek vakumda,

soğuk duvar vakum sisteminde ısıtılmış GaAs yüzeylerine çarpan Ga ve As₂ moleküllerinin reaksiyon kinetiğini inceledi (8,9). 500 °C'lık sıcaklığa sahip GaAs alttaş ile yaptığı bu deneyde, Ga atomlarının yüzeye yapışma katsayısının (yüzeye çarparak yüzeyde kalan Ga atomlarının sayısı) bire yakın olduğunu gördü. Bu deneyde epitaksiyel GaAs yapısı büyütülmüştür. Yüzey kinetiği çalışmaları hem Ga ve hem de As türlerine ait demetlerin ısıtılmış GaAs yüzeyine çarptığını gösterir. O halde her iki demet kaynağı büyüyen yüzeyin görüş hattında olmalıdır. Küçük efüzyon hücreleri demet yaratmak için kullanılıp elementsel Ga ve Ga'a ayrışan GaAs içerirler (10). Sıvı nitrojenle soğutulmuş soğuk duvar yüzey safsızlığını ve arsenik arka plan kısmi basıncını azaltmak için kullanılırlar. Cho, MBE'yi, soğuk panelleri artırarak, kaynakları genişleterek, demet akısını daha büyük doğrulukla kontrol ederek ve vakum vanalarının avantajlarından yararlanarak geliştirmiştir (11). Cho, ilk defa uygun elektriksel ve optiksel özelliklere sahip, yüksek vakum ortamında büyütülmüş yeterli derecede kaliteli GaAs yarıiletken heteroyapısını büyütülmüştür. Cho III-V grubu yarıiletken heteroyapılarının büyütüldüğü MBE tekniğinin başlangıcını hazırlamış ve 1969'da başlayan bu süreç son 35 yıldır oldukça gelişmiştir (12). Büyütme sırasında alttaş yüzeyinin ve büyüyen yüzeyin kristal yapısını karakterize etmek için kullanılan RHEED tekniğinin ("Reflection High Energy Electron Diffraction", Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı) kullanımı ilk defa Cho tarafından yapılmıştır (13,14). 1970 yılında Cho, ilk defa MBE tekniği GaAs üzerinde Al_xGa_{1-x}As heteroyapısını büyütmüşlerdir (15). O'nun 1969-1975 yılları arasında yaptığı çalışmalar; ilk AlGaAs/GaAs periyodik yapılarını ve tabaka morfolojisini, katkılanmasını, elektriksel ve optiksel özelliklerini, mikrodalga cihazları ve heteroyapılı lazerlerle ilgili araştırmaları içermektedir. Bu çalışmalar bugün son derece gelişmiş olan MBE tekniğinin zeminini oluşturmuştur (14,16-23).

Bu çalışmada, Moleküler Demet Epitaksi (MBE) tekniği kullanılarak, elektronik ve optoelektronik cihazların yapımında kullanılabilecek olan Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs süperörgü yapısı büyütüldü. Büyütülen bu malzemenin yapısal ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi üzerinde çalışıldı. MBE tekniği ile büyütülen Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs ince filminin yapısal analizi, Yarıiletken İleri Araştırma

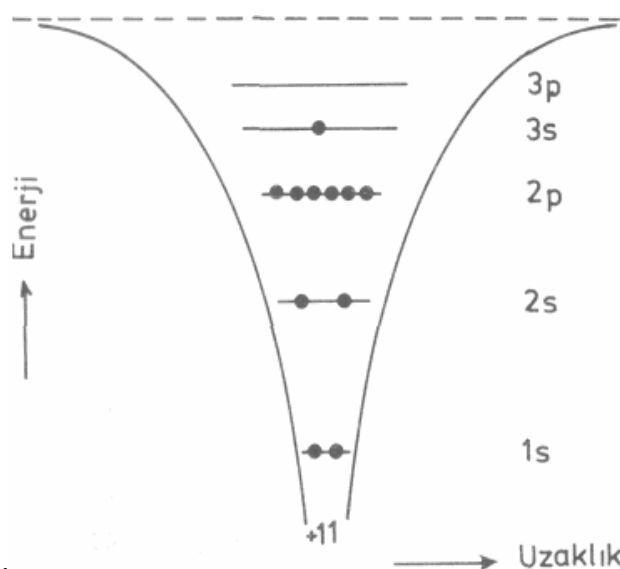
Laboratuvarında bulunan 4 kristalli monokromatör içeren Bruker-AXS D8-Discovery yüksek çözünürlüklü X – ışını kırınımı (HR – XRD) cihazı ile yapıldı. Malzemenin elektriksel karakterizasyonu 80 K-400 K sıcaklık aralığında Keithley 220 programlanabilir sabit akım kaynağı ve Keithley 614 elektrometre, HP 4192 LF empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) yardımıyla 100 kHz’te yapıldı. Son olarak elde edilen sonuçlar tartışıldı.

2. YARIİLETKENLER

Katılarda elektronik iletkenliğin açıklanması, enerji band teorisine dayanmaktadır. Burada katının kristal olduğu, yani atomlarının belirli bir geometri tanımlayacak şekilde düzgün bir dizilim içinde bulunduğu kabul edilecektir.

2.1. Enerji Bant Teorisi

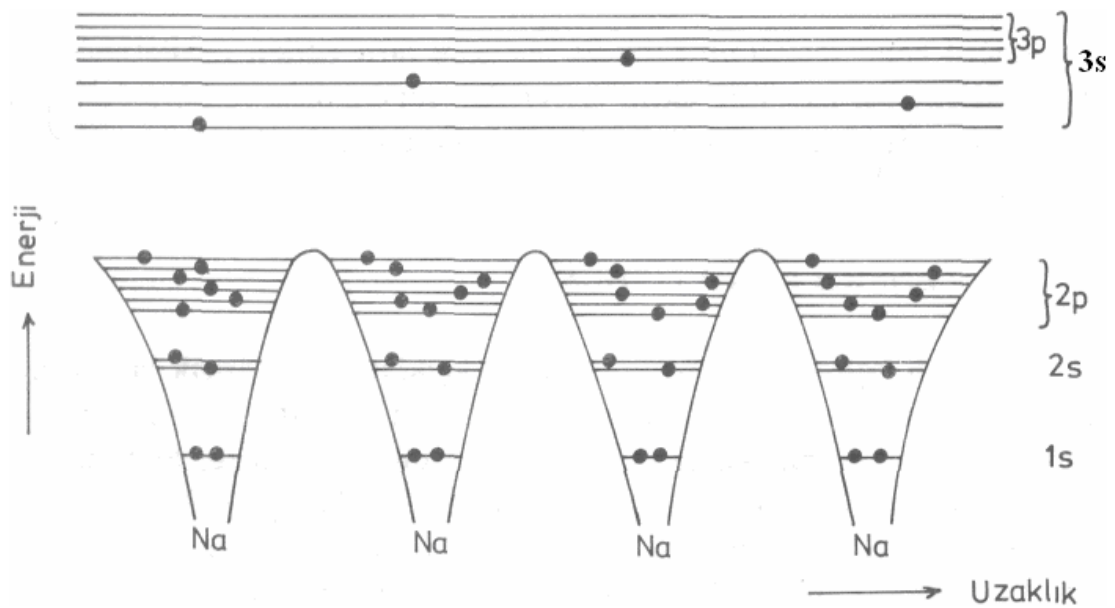
Teorinin kolay anlaşılır olması için, açıklamaların örnek bir atom üzerinde yapılmasında yarar vardır. Şekil 2.1' deki Sodyum atomuna ait elektron enerji seviyelerini gösteren diyagrama dikkat edilirse, Sodyumun 11 elektronunun, kuantum şartlarını sağlayarak 1s, 2s, 2p ve 3s seviyelerine yerleştikleri, 3p seviyesinin ise boş kaldığı görülür. 3s' deki elektron valans elektronu olup, kimyasal işlemlerde rol alır; diğer elektronlar ise yakınlıkları dolayısıyla çekirdeğe sıkı bağlı olduklarından, ısısal, optik ve kimyasal işlemlere kolayca katılamazlar (24).



Şekil 2.1. Sodyum atomuna ait elektron enerji seviyeleri diyagramı

Sodyum kristalinin oluşması için çok sayıda Sodyum atomunun biraraya geldiği dikkate alınırsa, Şekil 2.2' de 4 atom için çizilmiş olan diyagrama benzer bir durum ortaya çıkar. Şöyle ki; birbirine çok yaklaşan Sodyum atomlarının, en dış

yörüngelerden başlayarak, elektron dalgaları üst üste biner ve elektronlar aynı anda iki atoma birden ait olur. Bu durum, "Pauli Dışarlama İlkesi" ne aykırıdır; elektronlardan birinin kuantum şartlarında değişiklik olması gerekir. Böylece, serbest olan Sodyum atomunun elektron enerji seviyesi, Sodyum atomlarının biraraya gelmesinden sonra yarılmış olur. Yarılan seviyenin tanımladığı enerji aralığına "enerji bandı" adı verilir. Herbir elektron konumunda, spin nedeniyle 2 kuantum durumu bulunduğundan, Şekil 2.2' deki 4 atomlu model için 8 yarıma olması gerekir. Ancak, dalga fonksiyonu çiftlerinin yalnızca spin yönünden ayrılık göstermesi enerjide çok az bir fark doğurur. Böylece enerji seviyelerinde 8 yerine 4 yarıma gözlenir. Dolayısıyla enerji bandında, kristaldeki atom sayısı kadar enerji seviyesi vardır. Aynı şekilde, bir kristalde, kristali oluşturan atomların serbest halde sahip oldukları elektron enerji seviyesi sayısı kadar enerji bandı bulunur. Gerçekte, yarılmadan sonra oluşan seviyeler kesiklidir. Fakat seviyeler arası, 10^{19} eV gibi o kadar küçüktür ki, seviyelerin sürekli bir band oluşturduğu kolayca söylenebilir. Elektron dalga fonksiyonlarının kuvvetli etkileşmesi nedeni ile, dış yörüngelere ait enerji bandları, iç yörüngelerinkine nazaran daha geniştir. Hatta, en iç yörünge için, etkileşmenin hiç meydana gelmemesinden dolayı band kavramından söz edilmez.

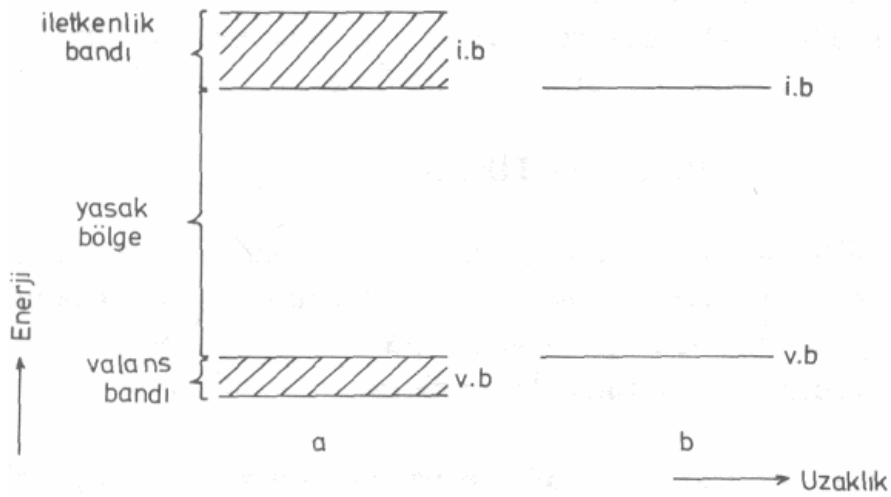


Şekil 2.2. 4 Sodyum atomunun biraraya gelmesi halinde elektron enerji seviyeleri diyagramı(24)

Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi, yarılmadan sonra dış bantlar üst üste binebilir. Genellikle dış bantlarda kuantum durumları ya boş veya kısmen doludur. Bantlar oluşuktan sonra, bantlar arası elektron geçişleri başlar ve istatistiksel bir denge kuruluncaya kadar, geçişler devam eder. Bu suretle alt bandlar üst bandlardaki elektronlarla doldurulmuş olur. En üstteki dolu banda valans bandı adı verilir ve elektronlarla dolu olması nedeniyle bu bandda elektron iletkenliği meydana gelmez. Valans bandının üstünde bulunan ve atomların en dış yörüngelerine tekabül eden boş veya kısmen boş olan banda ise iletkenlik bandı denir. Elektron iletkenliği ancak bu bandda mümkündür. Tanıma göre, Sodyumun üst üste binen 3s ve 3p seviyelerine ait band, iletkenlik, 2p seviyesine ait olanı da valans bandıdır, iletkenlik ve valans bandları arasındaki enerji aralığı, hiçbir kuantum durumuna sahip bulunmadığından elektron içermez ve "yasak enerji bölgesi" adını alır. Şu halde bir katı, Şekil 2.3a' da gösterildiği gibi, birbirinden belirli bir enerji aralığı ile ayrılmış valans ve iletkenlik bandlarından ibaret olarak gösterilebilir; hatta, Şekil 2.3b' deki gibi yasak enerji aralığını tanımlayacak şekilde, valans bandının üst, iletkenlik bandının alt çizgisi ile temsil edilebilir (24). Elektronlarla dolu olan valans bandında çok az sayıda boşluk vardır. Bu boşluklara "deşik (hole)" adı verilir. Herhangi bir suretle, enerji aralığını aşarak valans bandından iletkenlik bandına çıkan elektronun yerinde birdeşik kalır. Budeşğin valans bandındaki bir elektronla doldurulması halinde, o elektronun yerinde yeni birdeşik belirir. Böylece elektronun yer değıştirmiş olması yerine,deşik hareket etmiş gibi düşünülebilir. Bu düşüncenin bazı matematiksel kolaylıklar getirmesinden dolayı, valans bandındaki elektron yerdeğişimleri,deşik hareketi şeklinde yorumlanmaktadır. Şu halde, iletkenlik bandında elektron, valans bandında isedeşik iletkenliğinin mümkün olduğu şekilde bir sonuca varılabilir. Deşikler pozitif yüklüdür.

Genel olarak iletkenliğin tanımlanması, iletkenlik ve valans bantlarındaki taşıyıcı (elektron vedeşik) sayısı ile bu iki band arasındaki yasak enerji bölgesinin genişliğine göre yapılabilir. Taşıyıcı sayısı çok az ve yasak bölge çok genişse bu katıya "yalıtkan" denir. Şayet iki band birbirine çok yakın veya üst üste binmiş ise, valans bandındaki elektronların iletkenlik bandında bulunması nedeniyle bu katı "iletken"dir. Taşıyıcı sayısı az, yasak enerji bölgesi yalıtkan ve iletkenin arasında bir büyüklükte ise katıya

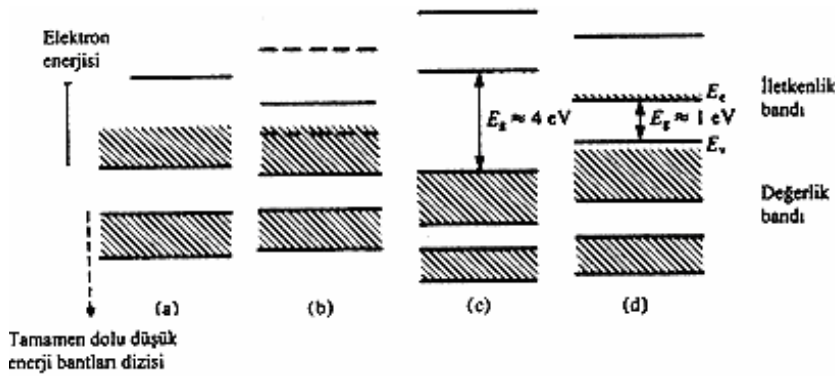
"yarıiletken" adı verilir. Elmas, Kadmiyum Sülfür, Çinko Sülfür gibi kristaller yalıtkanlara, metaller iletkenlere ve Germanyum, Silisyum, Galyum Arsenik, Bakır Oksit gibi kristaller de yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir (24).



Şekil: 2.3. Bir katının valans ve iletkenlik bantlarının temsili gösterimi

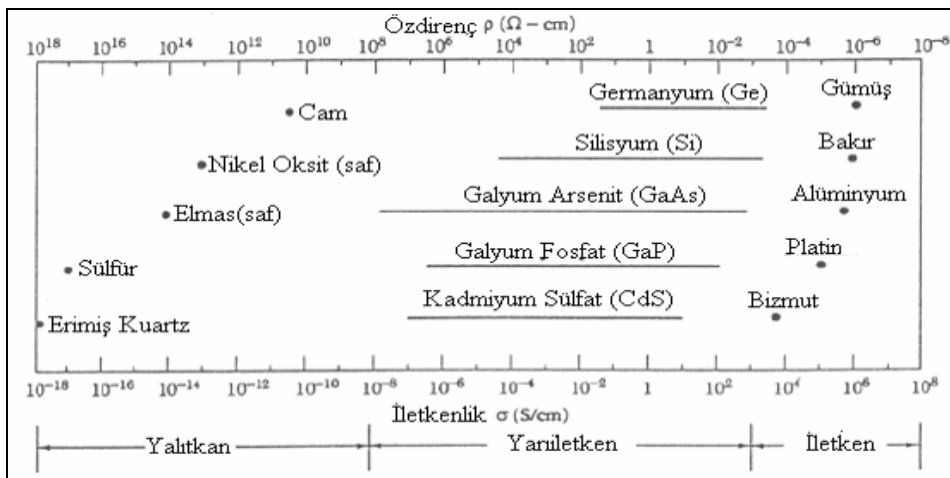
Metallerin (şekil 2.4(a), (b))(iletkenler), iletkenlik bantı ya kısmen boş ya da valans bantı ile çakışmış durumdadır (25). Böylece yasak bant aralığı (E_g) yoktur, kısmen dolu olan valans bandının üstünde bulunan elektronlar, uygulanan küçük bir elektrik alandan kinetik enerji kazanarak, yakındaki enerji seviyesine doğru hareket edebilirler. Yalıtkanlarda, valans elektronlarının komşu atomlarla yaptığı güçlü bağları kırmak çok zordur ve sonuç olarak oda sıcaklığında yada oda sıcaklığı civarındaki sıcaklıklarda, akım iletimine katılacak serbest elektronlar yoktur (26). Şekil 2.4(c)' de görüldüğü gibi, yalıtkanlar geniş bant aralığı ile karakterize edilirler ve valans bandındaki tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından doldurulmuş, iletkenlik bandındaki tüm enerji seviyeleri ise boştur. Termal enerji ya da uygulanan elektrik alan nedeniyle kazanılan enerji, valans bandının en tepesinde bulunan elektronları iletkenlik bandına göndermek için yeterli değildir. Böylece, çok az sayıdaki elektron iletkenlik bantı seviyelerini işgal eder. Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle yarıiletkenlerde, izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır (yasak bant aralığı) ve bu yasak bant aralığı 1 eV mertebesinde olup (dar bant aralıklı malzeme), yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri yasak bandın altında ve üstünde yerleşir. Yasak

bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi valans bandı ve üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik bandı olarak adlandırılır. Şekil 2.4(d)' de yarıiletkenlerin bant diyagramı gösterilmiştir. $T=0\text{ K}$ 'de, tüm elektronlar valans bandındadır. İletkenlik bandında bir çok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolaylıkla hareket ettirebilir ve bir akım meydana gelir. Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenlikteki bu tür bağımlılıklar, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirir.



Şekil 2.4. İletken, yalıtkan ve yarıiletkenin enerji bantlarının şematik gösterimi:

(a) kısmen dolu değerlik bandıyla bir metal, (tek değerlikli metaller), (b) iki üst üste gelmiş kısmen dolu bantlı bir metal, (iki değerlikli metaller), (c) bir yalıtkan ve (d) bir doğal yarı iletken. Taralı yerler dolu elektron seviyelerini gösterir (24)

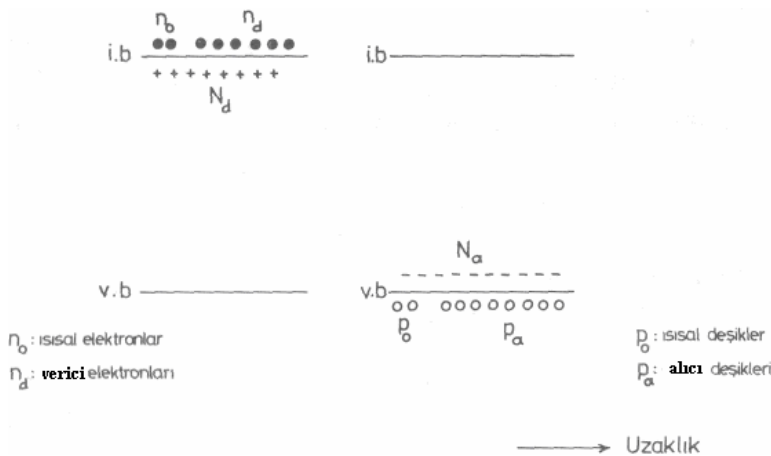


Şekil 2.5 Metal yarıiletken ve yalıtkanlar için iletkenlik aralığı (26)

2.2. Yarıiletken Tipleri

Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) özellikleri en iyi bilinen ve elektronik endüstrisinde çok geniş uygulama alanı bulunan yarıiletkenlerdir. Yarıiletkenler, önce saflıklarına göre, saf ve saf olmayan yarıiletkenler olmak üzere ikiye ayrılır. Saf yarıiletkenler, içinde safsızlık maddesi bulunmayan katılardır, iletkenlik bandındaki elektron sayısı, valans bandındaki boşluğa eşittir. Örneğin, Si de bu sayı yaklaşık olarak cm^3 başına 10^{10} , Ge de ise 10^{13} kadardır. Saf Si ve Ge'un öz dirençleri de yüksektir; Si'un 2.10^5 Ohm.cm, Ge'un 42 Ohm.cm' dir. İçine belirli bir oranda safsızlık maddesi karıştırılan yarıiletken "saf olmayan yarıiletken" adı verilir. Bunlar, iletkenliğin çoğunlukla elektronlar yardımı ile sağlandığı n (negatif) tipi, iletkenliğin daha ziyade boşluklarla taşındığı p (pozitif) tipi olmak üzere iki tiptir (24).

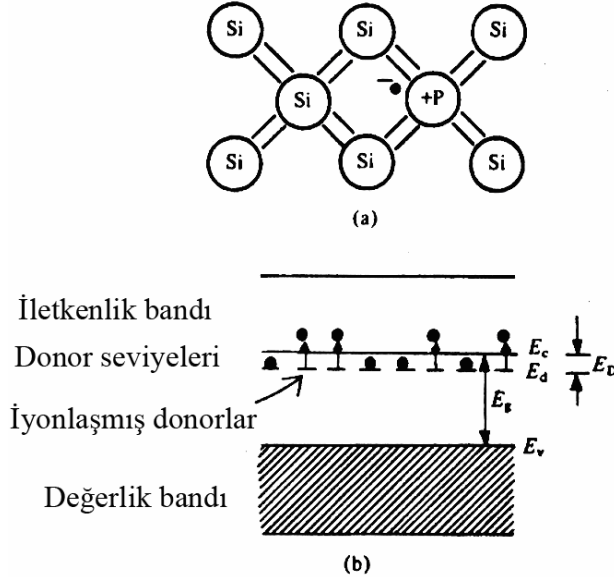
n tipi yarıiletken, 4 valans elektronuna sahip Si veya Ge' a, belirli yöntemlerle, As, Sb, P, N, ... vb. gibi 5 valans elektronuna sahip maddelerin katılması ile elde edilir. Safsızlık maddesinin 4 elektronu kristalin 4 elektronu ile "elektron-çifti" bağı yapar; bir elektron serbest kalır. Yani safsızlık atomları iyonize olur. Safsızlık atomlarının (donör), bulundukları enerji seviyesine "donör seviyesi" denir. n tipi yarıiletkenin enerji diyagramı Şekil 2.6(a)' da gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi donör seviyesi iletkenlik bandına çok yakındır; serbest olan donör elektronları ise iletkenlik bandında bulunarak, yarıiletkenin serbest elektron sayısını artırır.



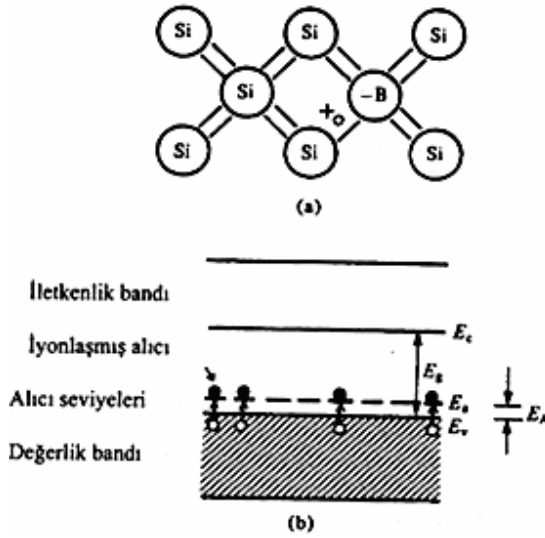
Şekil: 2.6 n ve p tipi yarıiletkenlerin enerji seviye diyagramları

Si ve Ge yarıiletkenlerine, B, Ga, In, Al,... vb. gibi 3 valans elektronuna sahip maddelerin katılması ile p tipi yarıiletken elde edilir. Safsızlık atomlarının 3 elektronu Si veya Ge'un 4 elektronu ile "elektron-çifti" bağı yapar, fakat her bir bağ için bir boşluk, yani bir deşik oluşur. Deşik, kristal örgüsü içinde serbesttir ve valans bandında bulunur, yani bir deşik oluşur. Deşik, kristal örgüsü içinde serbesttir ve valans bandında bulunur, iyonize olan bu 3 değerli safsızlık atomlarına "akseptör", işgal ettikleri enerji seviyesine de "akseptör seviyesi"denir. Valans bandına çok yakın olan akseptör seviyesi Şekil 2.6(b)'de gösterilmektedir. Bundan dolayı yarıiletkenin serbest deşik sayısı artmış, akımın çoğunlukla deşikler yardımı ile taşınması sağlanmış olur. Yasak enerji bölgeleri sırasıyla 1,12 eV ve 0,67 eV olan Si ve Ge yarıiletkenlerinde genellikle donör seviyeleri iletkenlik bandının 0,04 - 0,08 eV kadar altında, akseptör seviyeleri ise valans bandının aynı enerji büyüklüğü kadar üstünde uzanır (24).

n tipi bir yarıiletkende elektronlara "çoğunluk taşıyıcıları", deşiklere "azınlık taşıyıcıları" denir. p tipi yarıiletkende ise bu tanım terstir; yani deşikler çoğunluk, elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır. Şekil 2.7 ve 2.8' de n ve p tipi yarıiletkenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.7. n-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi. (a) bir silikon atomunun bir fosfor safsızlık atomu ile yerdeğiştirdiği kristal örgü (b) donör safsızlık atomlarının enerji seviyeleri (bu diyagram bazı safsızlıkların iletkenlik bandına bir elektron bıraktığını göstermektedir).



Şekil 2.8. p-tipi yarıiletkenin şematik gösterimi. (a) üç değerlikli safsızlık (mesela bor) beraber kristal örgüsü (b) alıcı safsızlık atomlarının enerji seviyeleri (bazı safsızlıklar değerlik bandından elektronları almışlardır (24))

Elementsel yarıiletkenler (Çizelge 2.1) (Ge ve Si), tek tip atomlardan oluşurlar. Her bir atom, bir elektronunu en yakın komşusuyla paylaşarak kuvvetli bir kovalent bağ oluşturur. Bileşik yarıiletkenler iki veya daha çok elementin iyonik ve kovalent bağlanmasıyla oluşurlar. Kimyasal formülü AB olan ikili bileşik yarıiletken bileşikte, A elementi üç, B elementi de beş valans elektronuna sahipse, bunlara “III-V (üç-beş) bileşikleri” denir. Üçlü bileşik yarıiletkenler bileşiğe küçük miktarlarda üçüncü elementin eklenmesiyle meydana gelirler. Bir üçlü bileşik yarıiletken olan $Al_xGa_{1-x}As$ ’ın kimyasal formülünde yer alan x, elementlerin alaşımdaki kompozisyonlarını gösterir. Dörtlü bileşik yarıiletkenler $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ formundadır. Dörtlü bileşik yarıiletkenler, ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşimiyle oluşur. Galyum arsenik bileşik yarıiletkeninde galyum periyodik cetvelin III. grup, arsenik ise V. grup elementidir (böyle yarıiletkenler sıkça III-V grubu bileşikleri olarak isimlendirilirler). Bu durumda n- ve p-tipi zenginleştirme farklı bir çok yolla gerçekleştirilebilir. Mesela çinko gibi bir ikinci grup elementi galyum atomlarıyla yer değiştirirse malzeme p-tipi olur; eğer tellur gibi bir altıncı grup elementi arsenik ile yer değiştirirse n-tipi olur. Germanyum ve silikon gibi IV. grup elementleri, IV. grup safsızlıklarının sırayla arsenik veya galyum iyonlarının hangisiyle yer değiştirdiğine bağlı olarak p veya n-tipi madde üretebilir. Benzer

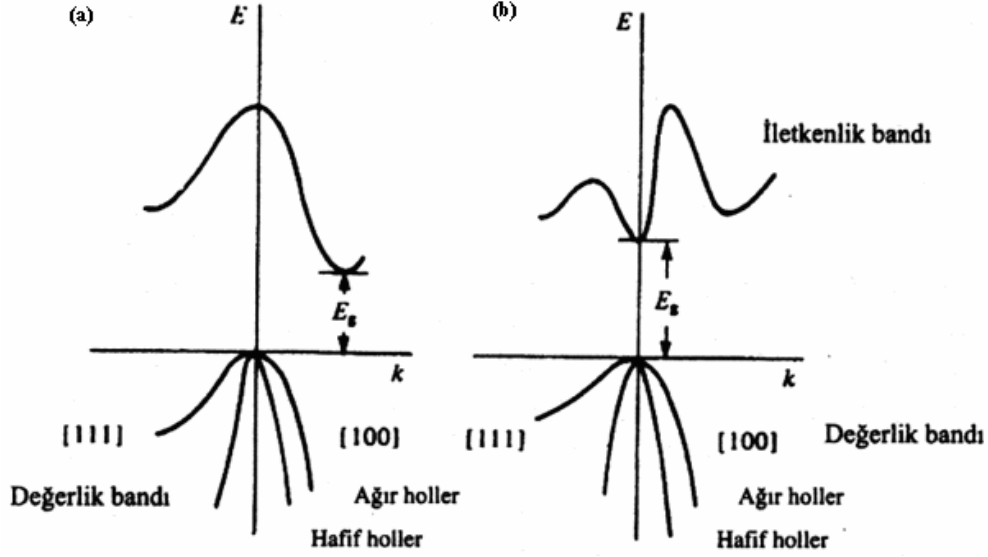
durum CdS ve ZnSe gibi II-VI grubu bileşik yarıiletkenler ve üç veya dört elementli (GaInAs ve GaInAsP gibi) yarıiletkenler içinde geçerlidir (27).

Çizelge 2.1. Bazı elementsel, ikili, üçlü ve dörtlü bileşik yarıiletkenler

Genel Sınıflandırma	Sembol	
Elementsel yarıiletkenler	Ge	
	Si	
İkili bileşik yarıiletkenler	IV-IV	SiC
	III-V	AlAs
		GaAs
		GaN
		GaP
	II-VI	ZnO
		ZnS
		CdSe
		CdTe
	IV-VI	PbS
		PbTe
Üçlü bileşik yarıiletkenler	$Al_xGa_{1-x}As$	
	$Al_xIn_{1-x}As$	
	$GaAs_{1-x}P_x$	
	$Ga_xIn_{1-x}As$	
Dörtlü bileşik yarıiletkenler	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	
	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	
	$Al_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	

Enerji bandlarının şekline göre yarıiletkenleri iki sınıfa ayırabiliriz; direk bant aralığına sahip yarıiletkenler ve indirek bant aralıklığına sahip yarıiletkenler. Bir yarıiletken, birinci Brillouin Bölgesinde bulunan elektronunun enerjisinin (E), dalga vektörü ($\vec{k}$) ile değişimi ile tanımlanır. Yarıiletkenlerde, valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu 1.Brillouin Bölgesinin merkezindeki $\vec{k}=0$ noktasında oluşur. Bu şekildeki bant aralıklı yarıiletkenlere “direkt bant yarıiletkenler” denir. Şekil 2.9(b)’ de direkt bant yarıiletkenlerin optik soğurma

diyagramı verilmiştir. Direkt geçiş $\vec{k}$ değerinde önemli bir değişikliğe yol açmaz, çünkü soğurulan fotonun dalga vektörü küçüktür.



Şekil 2.9.(a) İndirek ve (b) Direk bant aralığı

Sürekli optik soğurma bölgesinin eşik frekansı ω ise, bant aralığı $E_g = \hbar\omega$ ile verilir. Doğrudan soğurma olayında, bir foton kristal tarafından soğurulurken, bir elektron ve bir deşik yaratılır. İletkenlik bandı minimumu ve valans bandı maksimumu aynı momentumda ($\vec{k}=0$ noktasında $p=0$) olduğu için, elektron valans bandından iletkenlik bandına, momentumunu değiştirmeden geçebilir. Bu tip yarıiletkenlerde iletkenlik bandı minimumu ile valans bandı maksimumu aynı doğrultuda değildir. Elektronun, valans bandının maksimumundan, iletkenlik bandının minimumuna geçiş yapması için, enerjisinin yanı sıra momentumunu da değiştirmesi gerekmektedir. Şekil 2.9(a)' da indirekt bant yarıiletkenlerin optik soğurma diyagramı verilmiştir. İndirekt geçiş hem foton, hem de fonon içerir; foton enerji sağlar, fonon ise momentum sağlar. Minimum enerji aralığında doğrudan bir foton geçişi, dalga vektörü korunumu koşuluyla sağlanamaz, çünkü bu enerji aralığında foton momentumu çok küçüktür.

Yarıiletkenlerde yasak bant aralığı (E_g), iletkenlik bandının (E_c) en düşük enerjisi (iletkenlik bant kıyısı) ile valans bandının (E_v) en yüksek enerjisi (valans bant kıyısı)

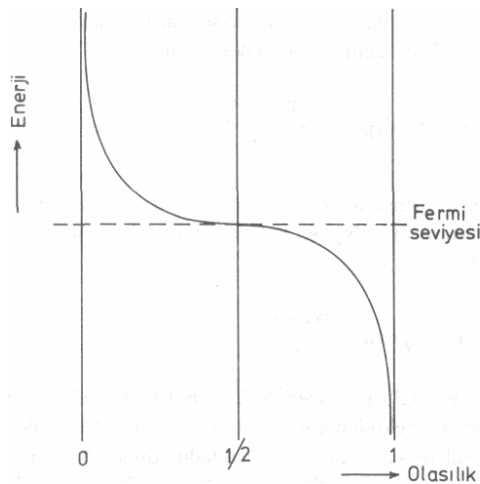
arasındaki enerji farkıdır. Bazı yarıiletkenlerin bant aralıkları Çizelge 2.2’te verilmiştir.

Çizelge 2.2. Tipik yarıiletkenlerin yasak bant aralığı burada d=direkt bant, i=indirekt banttır (25)

Kristal	Aralık	$E_g(\text{eV})$	
		0 K	300K
Elmas	i	5.47	-
Si	i	1.17	1.11
Ge	i	0.74	0.66
GaAs	d	1.52	1.42
InP	d	1.42	1.27
GaP	i	2.32	2.25

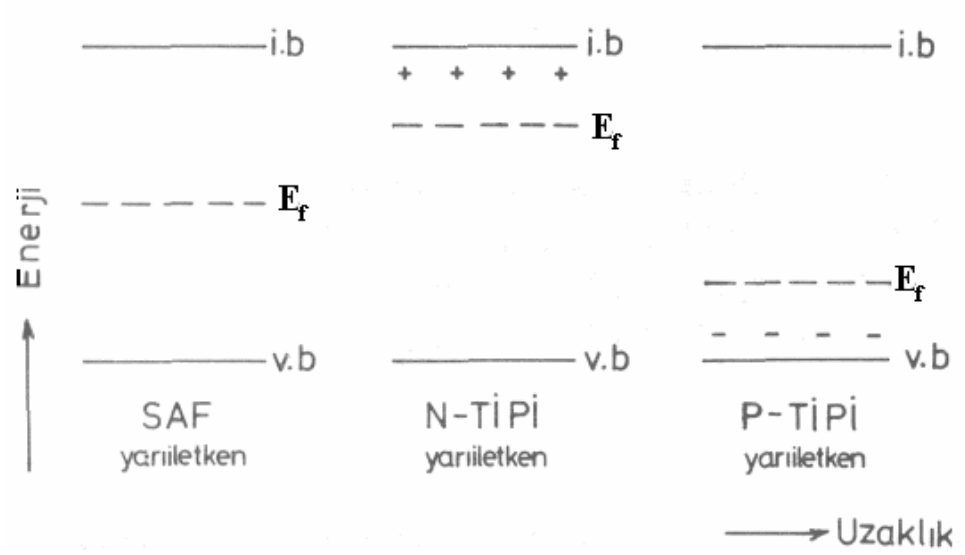
2.3. Fermi Enerjisi

Elektron ve deşikler, yarıiletkende, Fermi istatistiğine göre bir dağılım gösterirler. Fermi istatistiği, Pauli Dışarlama İlkesi' ne dayanır ve bir enerji seviyesinin dolu olmasını bir olasılık faktörü ile tanımlar. Bu olasılık faktörüne Fermi Faktörü de denir. Fermi Faktörü, dolu olma olasılığı söz konusu edilen seviyenin enerjisini, belirli bir referans enerjiye göre tanımlayan bir terim içerir. Referans enerji aslında var olmayan, iletkenlik ve valans bandlarındaki taşıyıcı sayısına göre, yasak enerji bölgesinde konum alan, hayali bir seviye olup "Fermi Enerji Seviyesi" adını taşır.



Şekil: 2.10 Fermi Faktörünün enerji ile değişimi

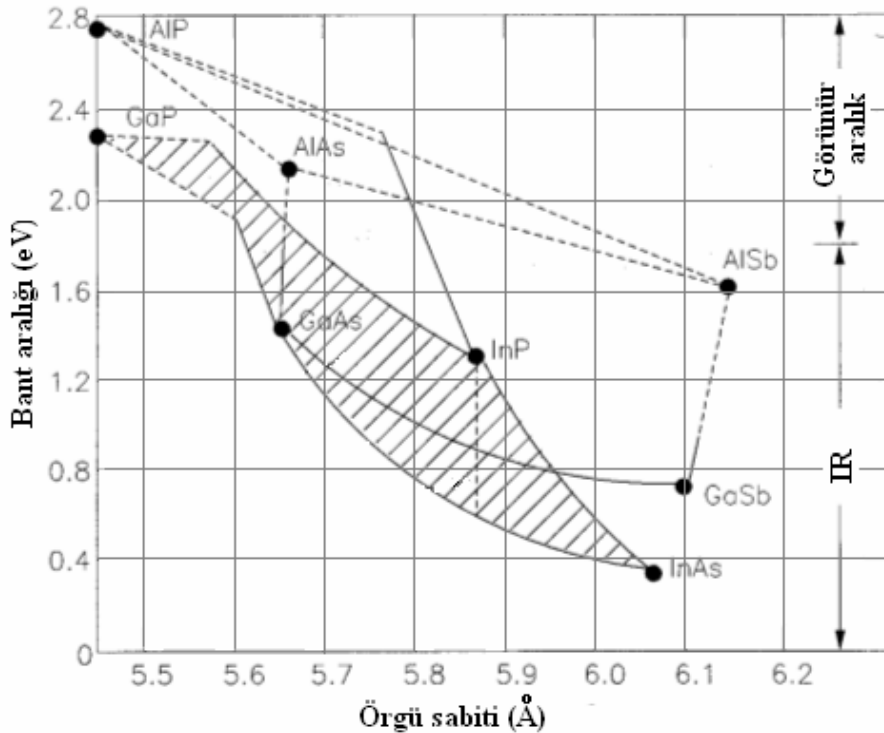
Fermi enerjisinden yukarıya çıkıldıkça dolu olma olasılığı azalmakta, aşağı inildikçe çoğalmaktadır. Öyleyse, bir yarıiletkende boş konumlar iletkenlik bandında, dolu konumlar ise valans bandında çoğunluktadır.



Şekil: 2.11 Saf ve saf olmayan yarıiletkenlerde Fermi Enerjisinin konumu (24)

3. YARIİLETKEN ALAŞIMLAR

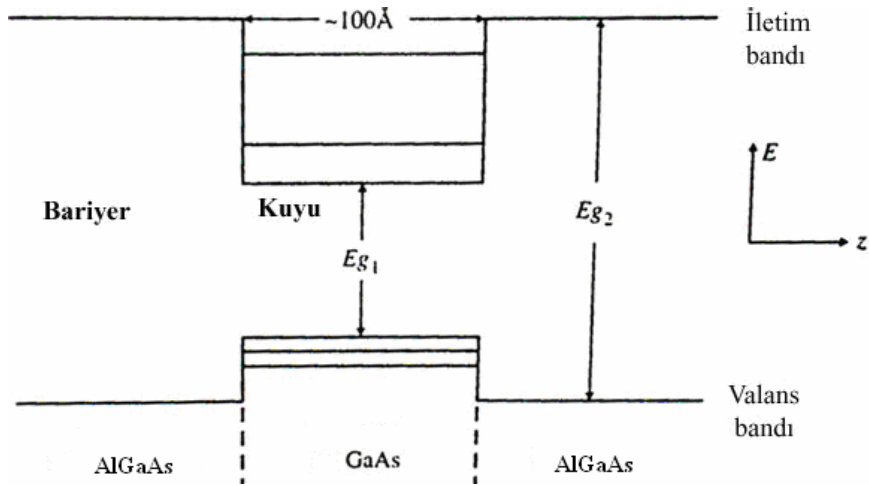
Optoelektronikteki birçok uygulama band aralığından geçerek bir elektron ve bir holün birleşmesiyle ışığın emisyonu veya band aralığı enerjisine sahip ışığın absorpsiyonuyla bir elektron hol çifti oluşumunu içerir. Bu yüzden band aralığı büyük önem taşır. Şekil 3.1’ de daha yaygın önemli ikili yapıların band aralıkları ve örgü parametreleri görülmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar arzu edilen band aralığına ulaşma amacı ile (Ga,Al)As ve (Hg,Cd)Te gibi üçlü alaşımların yapımını içerir. Bu alaşımlar içinde $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ teknolojik önem taşır; çünkü GaAs ve AlAs örgü parametresinin çok küçük farklılığıyla tüm ($0 \leq x \leq 1$) birleşim alanında çok iyi bir katı çözümü olarak şekillenir; bu demektir ki çok yüksek kaliteli çoklu tabakalar yapılabilir. Direk band aralığının bir çeşidi $0 \leq x \leq \sim 0.35$ aralığında elde edilebilir. $x \geq \sim 0.35$ aralığında da indirekt band aralığı elde edilir (28).



Şekil 3.1. III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı- örgü parametresi değişimi. Katı çizgiler direkt bant aralığını ve kesikli çizgiler ise indirekt bant aralığını göstermektedir(28)

3.1. Kuantum Kuyuları

En basit çoklu tabaka sistemi veya heteroyapı (hetero= birden daha fazla olan demektir; örneğin birden fazla yarıiletkenin oluşmuş yapı) bir kuantum kuyusudur. AlGaAs gibi geniş band aralığına sahip bir materyal üzerine GaAs gibi daha dar aralığa sahip materyal $\sim 2 - 100$ nm arasındaki bir kalınlıkla büyütülürse ve bunun da üzerine tekrar daha geniş band aralığına sahip AlGaAs tabakası büyütülürse kuantum kuyulu bir yapı oluşur. Burada daha geniş aralıklara sahip materyaller bariyer materyal, daha dar aralıklara sahip materyalede kuyu denir. Şekil 3.2 oluşan iletim ve valans band kıyılarını gösteriyor, burada iletim bandı kıyısındaki ve valans bant kıyısındaki basamak yükseklikleri yapının içerdiği iki materyalin özelliklerine bağlıdır(29).



Şekil 3.2 Basit bir heteroyapıda oluşan kuyu sistemi

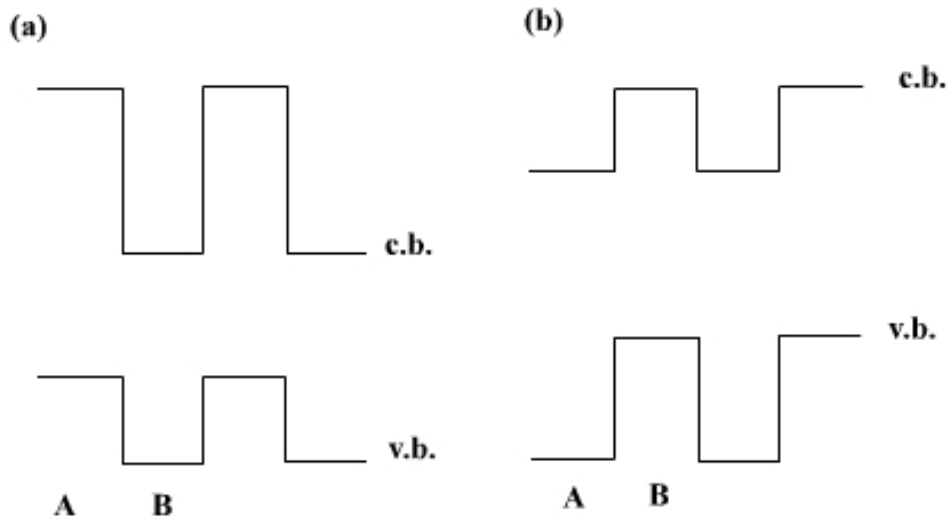
Daha dar aralıklı materyal iletim ve valans bandı içerisinde bir boyutlu kuyu olarak şekillenir. Bunun sonucu olarak z yönündeki büyümede elektron ve hole seviyeleri kuyunun durumları ile sınırlıdır ve bunlar altbant olarak bilinir. Kuyu üç dizi altbant içerir,

- Elektron altbandı
- Işık hol altbandı
- Ağır hol altbandı

holler derin kuyulara güçlü bir şekilde hapsedilir ve elektronlar da sığ kuyularda zayıf bir şekilde hapsedilir(30).

II. Tip süperörgüler

II. tip süperörgülerde, elektron kuyuları meteryalin birinde hole kuyuları da diğerinde oluşur. II. tip süperörgüler hole kuyularından daha yüksek enerjiye sahip olan elektron kuyuları olup olmamasına göre, ikiden fazla tabakaya bölünebilir.

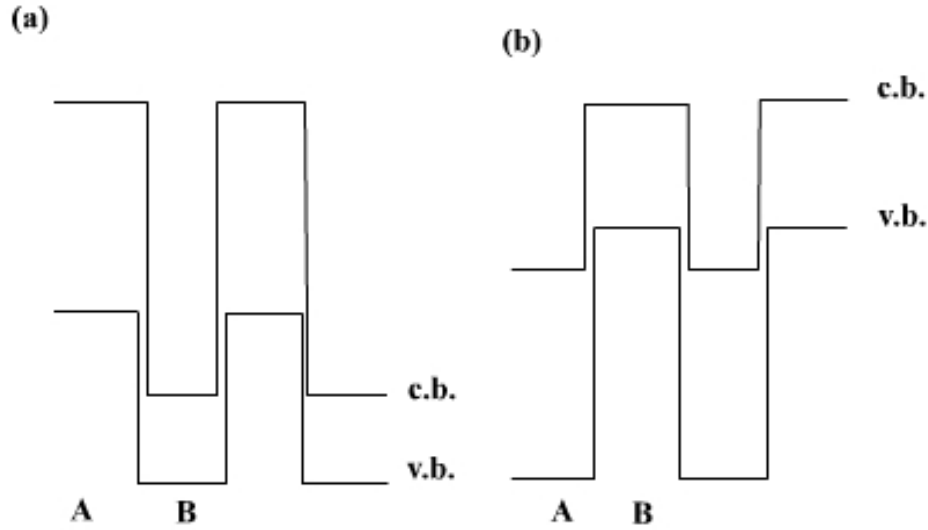


Şekil 3.4 Mümkün olan iki bant durumu

Bu basit durum elektron kuyusundaki en alt durumun enerjisinin hole kuyusunun en üst durumunun enerji seviyesinden fazla olduğu süperörgülerde olur. Şekil 3.4 mümkün olan iki bant durumunu gösteriyor. Bu gibi sistemlerde diğer bir ilgi çekici olay da hole ve elektron durumlarının bir dereceye kadar uzaysal dağılımıdır. Geniş band durumunda, elektronun alt tabaka dalga fonksiyonu başlıca bir materyalde ve holler ise diğer tabakada olacaktır. Süperörgüler durumunda, elektron ve hole miniband dalga fonksiyonları farklı tabakalarda en büyük değerlerine ulaşacaktır. Bu uzaysal dağılım hole ve elektron durumları arasındaki optiksel geçişi güçlendirecek yönde ayarlayacaktır. Geçiş boşluğu olmayan II. tür süperörgülere örnek Si-Ge ve (Ga,In)As-GaAs yapılarıdır(30).

III. Tip Süperörgüler(Geçiş boşluğu olan II.tür süperörgüler)

Geçiş boşluğu olan II. tip süperörgülerde, elektron kuyuları hole kuyularından daha düşük enerji seviyesindedir (bu durumdaki süperörgüler aynı zamanda III. tip süperörgüler olarak da bilinir). Bu durum şekil 3.5’de gösterilmektedir: Materyal B’nin boşluk bandı tamamen materyal A’nın boşluk bandının dışında kalıyor. InAs-(Ga,In)Sb sistemi II. tip geçiş bantlı süperörgülere örnektir. (Ga,In)Sb daha büyük boşluk bandına sahiptir ve onun iletkenlik bandı InAs’inkinden daha yüksek enerji seviyesinde bulunur.



Şekil 3.5 II. Tip süperörgüler

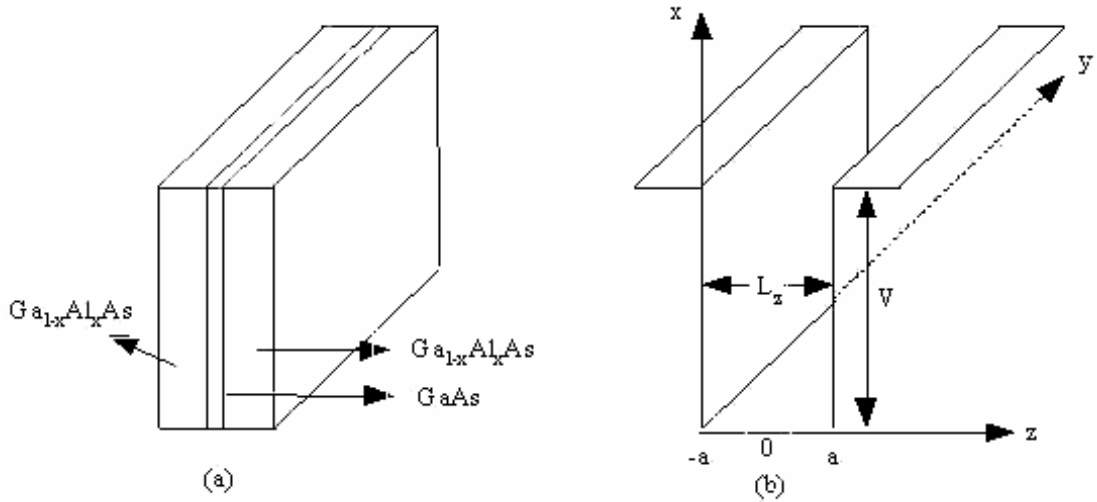
InAs-(Ga,In)Sb süperörgüler ilgi çekicidirler çünkü yarıiletken-yarımetal geçişi kuyu genişliğinin değiştirilmesi ile yapılabilir. Elektron durumlarının enerjiye bağlı ayrılması (InAs de olduğu gibi) ve hole durumları ((Ga,In)Sb de olduğu gibi) InAs bant genişliği tarafından belirlenir. InAs iletkenlik band etkin kütlesi (Ga,In)Sb’deki hollerinkinden çok daha küçüktür. Eğer tabakalar genişse, InAs’deki elektron durumları (Ga,In)Sb deki hole durumlarının altındadır. Bu sistemlerde elektron transferi (Ga,In)Sb’nin valans bandından (ayrılan hollerin ardından) InAs’nin iletkenlik bandı kuyusuna olur. Sistem böylece öz yarı metal olur.

Tabakaların kalınlığı azalırken, yarıiletken sistemde gerçekleşen InAs’deki elektron durumları (GaIn)Sb’deki hole durumlarının üstünde oluncaya kadar hapsedilen

enerjiler artar. Geçiş yeri (elektron ve hole durumlarının bulunduğu seviye) yaklaşık 85 Å bir InAs tabakasında olur (30).

3.2. Düşük Boyutlu Yarıiletkenler

Molecular Beam Epitaxy (MBE) gibi epitaksiyel büyütme tekniklerinden yararlanarak, farklı band aralığına sahip olan yarıiletkenlerin atomik tabakalar halinde birbiri ardına büyütülmesi ile elde edilen yapılar, düşük boyutlu ya da iki boyutlu olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, yarıiletkenlerde elektron ve boşlukların büyütme doğrultusunda kuantize olduğu ve diğer iki boyutta serbest olarak hareket edebildiği yapılardır.



Şekil 3.6 Al_xGa_{1-x}As-GaAs-Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyusu yapısının şematik olarak gösterimi. (a) Çok ince, dar band aralıklı bir GaAs aktif tabakası, iki kalın ve daha geniş band aralıklı Al_xGa_{1-x}As tabakaları arasına sandviçlenmiştir. (b) Elektronlar sonlu bir kare kuyu potansiyeli ile ince GaAs tabakasında tuzaklanmaktadır

Düşük boyutlu yarıiletkenler yapılar içerisinde üzerinde en çok araştırma yapılmış olanı GaAs ve Al_xGa_{1-x}As yarıiletkenlerinden oluşan yapıdır. Al_xGa_{1-x}As yarıiletkenindeki Al konsantrasyonu x , 0 ile 1 arasında değişebilir, x değerinin artması ile Al_xGa_{1-x}As'ın band aralığı (E_g) artar. Al_xGa_{1-x}As yarıiletkeni, alüminyum

konsantrasyonun, $x > 0.45$ olduğu değerler için indirek aralıklı, x 'in diğer bütün değerleri için direk aralıklıdır. Şekil 3.6' deki enerji diyagramında, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yarıiletkenlerinin üst üste büyütölmesi ile oluşmuş olan düşük boyutlu yapı gösterilmiştir(30).

GaAs tabakasındaki elektronların hareketleri, sonlu bir kuantum kuyusunda sınırlanmıştır. İletkenlik bandının kenarları elektronlar için, valans bandının kenarları da boşluklar için bir potansiyel kuyusu oluşturur. GaAs'ın band aralığı $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ın band aralığından daha küçüktür. Bu nedenle, GaAs bir kuantum kuyusu gibi davranır ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ elektron ve boşlukların her ikisi için de bir potansiyel engeli oluşturur. GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yarıiletkenlerinin band yapılarındaki bu farklılıktan dolayı, sistemin band diyagramında, iletkenlik ve valans bandı kenarları arasındaki geçiş bölgesinde basamak şeklinde süreksizlikler oluşmaktadır.

Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, büyütölen tabaka sayısına, kalınlığına ve büyütölen yapıların özelliklerine göre, "tekli/çoklu kuantum kuyuları (single/multiple quantum wells)" ya da "süperörgüler (superlattices)" olarak adlandırılırlar. Tekli kuantum kuyusu yapılarının ard arda büyütölmesi ile çoklu kuantum kuyusu yapıları elde edilmektedir. Çoklu kuantum kuyusu yapılarında, potansiyel bariyerinin genişliği, kuyu genişliğinden büyüktür. Süperörgülerde ise, bariyer genişliği kuantum kuyularına göre daha dar olduğundan, yüklü parçacıklar bir kuyudan diğer kuyuya tünellenebilmektedir, yani kuantum kuyusu içerisindeki elektron ve boşlukların dalga fonksiyonlarının kuyrukları ince bariyerleri rahatlıkla aşabilmekte ve komşu kuyulara ulaşabilmektedir(30).

3.3. Al, Ga ve As' ın Peryodik Cetveldeki Yeri ve Özellikleri

Al ve Ga şekil 3.7' de ki periyodik cetvelde de gösterildiği gibi III. grup, As ise V. grup elementleridir. Şimdi herbir elemente ait özellikleri ayrı ayrı inceleyelim.

I	II													III	IV	V	VI	VII	VIII
1	2													13	14	15	16	17	18
1 H 1.008																			2 He 4.003
3 Li 6.941	4 Be 9.012													5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305													13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.066	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80		
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.82	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29		
55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57 La 140.908	58 Ce 140.115	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.965	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04				
87 Fr (223)	88 Ra 226.025	89 Ac 227.028	90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)				

Şekil 3.7 Periyodik cetvel(31)

Çizelge 3.1 Al,Ga ve As'in özellikleri(31)

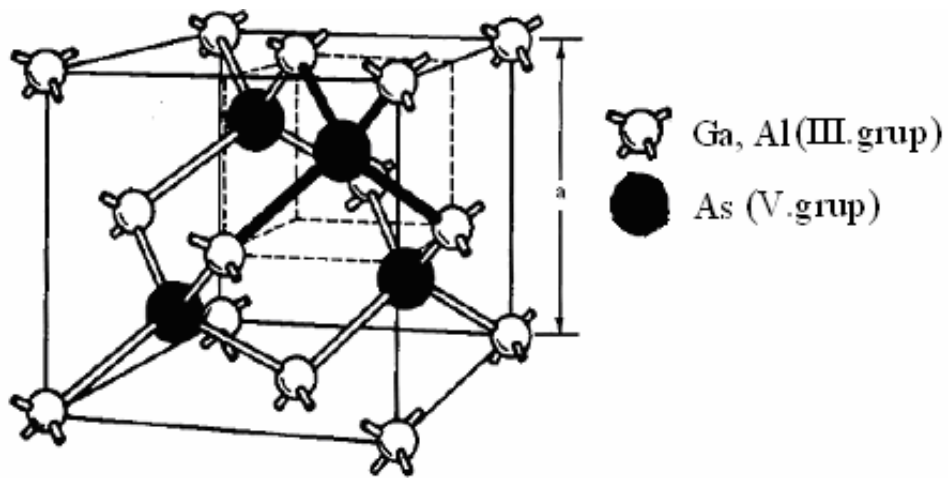
Adı	Alüminyum	Galyum	Arsenik
Sembol	Al	Ga	As
Atom Numarası	13	31	33
Atomik Yığın	26.982 amu	69.723 amu	74.9216 amu
Erime Noktası	660.37 °C	29.78 °C	817.0 °C
KaynamaNoktası	2467.0 °C	2403.0 °C	613.0 °C
Proton ve Elektron sayısı	13	31	33
Nötron Sayısı	14	39	42
Sınıfı	Diğer Metaller	Diğer Metaller	Ametaller
Elektrisel İletkenlik	382 microohm/cm ³	0.058 microohm/cm ³	0.029 microohm/cm ³
Atom Çapı	1.82 Å ⁰	1.81 Å ⁰	1.33 Å ⁰
Kristal Yapısı	Kübik	Ortorhombic	Rhombohedral
Oda Sıcaklığında	Katı	Katı	Katı
Elektronegatifliği	1.61	1.81	2.18
Yüksetgenme Basamağı	3	3	±3,5
Yoğunluk	2.702 g/cm ³	5.907 g/cm ³	5.72 g/cm ³
Bulunuş Tarihi	1825	1875	Antik Çağ
Buluşu Yapan	Hans Christian Oersted	Paul Emile Lecoq de Boisbaudran	Bilinmiyor

3.4. GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın $T= 300 \text{ K}$ 'deki Fiziksel Parametreleri

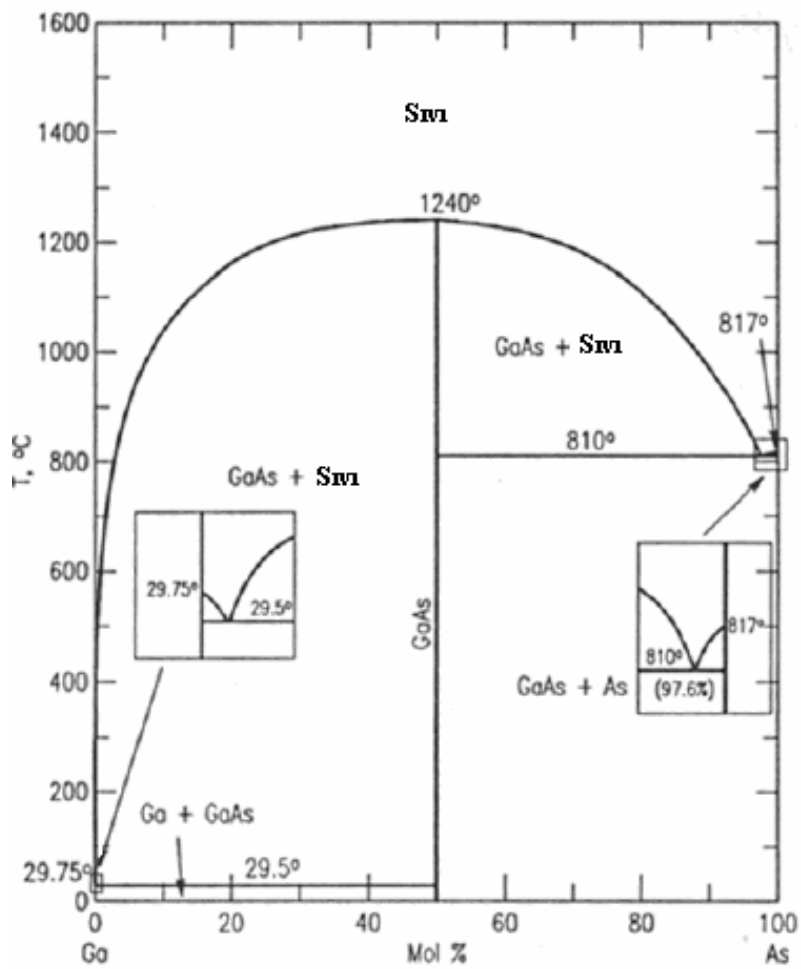
3.4.1. GaAs'ın $T= 300 \text{ K}$ 'deki fiziksel parametreleri

Çizelge 3.2 Oda sıcaklığında GaAs'a ait bazı fiziksel parametreleri(26,32,33)

GaAs (T=300K)		
Kristal yapısı (Şekil 3.11)		Çinko sülfür
Yasak bant aralığı (eV)		1.424
Örgü sabiti (Å)		5.65325
Atom/cm ³		4.42x10 ²²
Dielektrik sabiti	statik	12.4
	Yüksek frekans	10.89
İletkenlik bandı efektif DOS (cm ⁻³)		4.7x10 ¹⁷
Valans bandı efektif DOS (cm ⁻³)		7x10 ¹⁸
Elektron etkin kütlesi(m_e/m_o)		0.063
Deşik etkin kütlesi (m_h/m_o)	Ağır m_{hh}	0.51
	Hafif m_{lh}	0.082
Erime noktası (K)		1513
Termal genleşme katsayısı(10^{-6}K^{-1})		6.03
Elektron ilgisi(V)		4.07
De Broglie elektron dalgaboyu(Å)		240



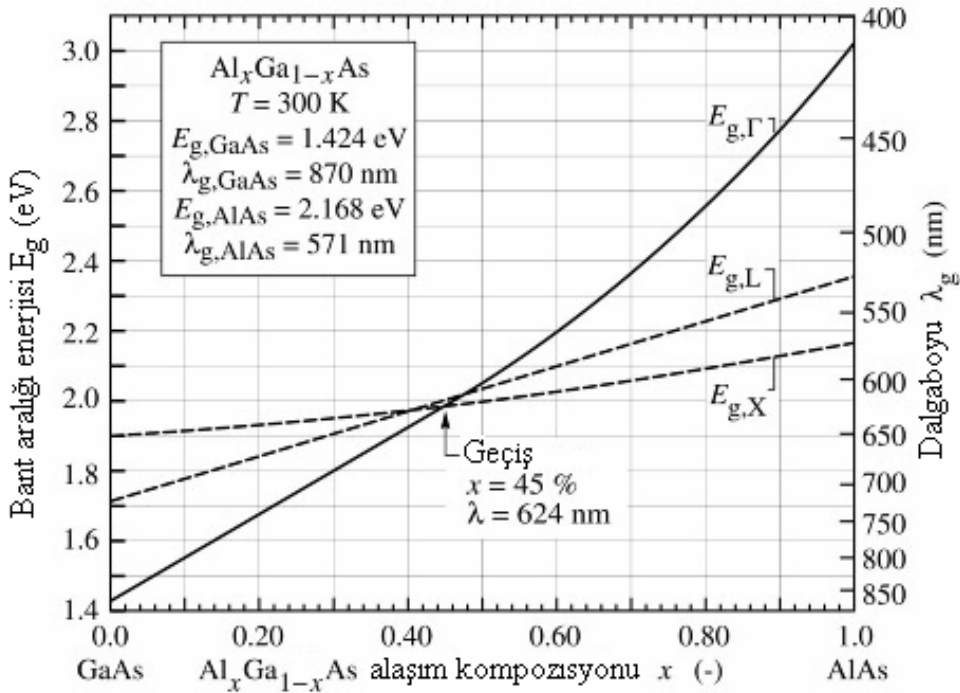
Şekil 3.8 GaAs kristal yapısı (çinko sülfür kristal yapısında)(26)



Şekil 3.9 GaAs için faz diyagramı (26)

3.4.2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 'ın bant yapısı

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ üçlü bileşiği %x(AlAs) ve %(1-x) (GaAs)'tan oluşur. Yarıiletkendeki x kompozisyonunun $0 \leq x \leq 1$ şeklinde değişmesiyle, bant yapısı da indirekt geçişli ve direkt geçişli olacak şekilde değişim gösterir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ bant yapısı $x \leq 0.45$ değerleri için direkt bant yarıiletken ve $x \geq 0.45$ değerleri için indirekt bant yarıiletken özelliği gösterir. Şekil 3.1'da III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı-örgü parametresi değişimi ve Şekil 3.10'de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi gösterilmiştir(28).



Şekil 3.10. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi. $E_{g,\Gamma}$ Γ noktasındaki direkt geçişi ve E_L ve E_X sırasıyla Brillouin bölgesindeki X ve L noktalarındaki indirekt geçişi göstermektedir(28)

3.4.3. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ' ın $T= 300 \text{ K}$ 'deki fiziksel parametreleri

Çizelge 3.3 Oda sıcaklığında $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'a ait bazı fiziksel parametreler(32-37)

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$		
Kristal yapısı		Çinko sülfür
Yasak bant aralığı(E_g) (eV)	Direkt bant	$1.424+1.247x$, $(0 \leq x \leq 0.45)$
	İndirekt bant	$1.900+0.125x+0.143x^2$, $(0.45 < x \leq 1.0)$
Örgü sabiti($\text{\AA}$)		$5.65325 + 0.00809x$
Atom/ cm^3		$(4.42-0.17x) \cdot 10^{22}$
Statik dielektrik sabiti		$12.40-2.84x$
Yüksek frekans dielektrik sabiti		$10.89 - 2.73x$
İletkenlik bandı efektif DOS (cm^{-3})		$N_c = (2.510 \cdot 10^{19}) \left(\frac{m_e}{m_o} \right)^{3/2}$
Valans bandı efektif DOS (cm^{-3})		$N_v = (2.510 \cdot 10^{19}) \left(\frac{m_h}{m_o} \right)^{3/2}$
Elektron etkin kütlesi		$m_e = (0,063+0,083x)m_o$
Deşik etkin kütlesi $m_{p,h}$ ağır deşik kütlesi $m_{p,l}$ hafif deşik kütlesi		$m_{p,h} = (0,51+0,25x) m_o$ $m_{p,l} = (0.62 + 0.14x) m_o$
Erime noktası (K)		$T_s = 1511-58x+560x^2$, katılaşmış yüzey $T_l = 1511+1082x-580x^2$, sıvılaştırmış yüzey
Termal genleşme katsayısı (10^{-6}K^{-1})		$\alpha_x = 5.97-1.76x$
Elektron ilgisi (eV)		$4.07-1.1x$, $(0 \leq x \leq 0.45)$ $3.64-0.14x$, $(0.45 < x \leq 1.0)$

4. EPİTAKSİYEL BÜYÜTME

Epitaksi kelimesi Yunanca iki kelimenin birleşiminden oluşur: $\epsilon\pi$ (epi) ve $\tau\alpha\chi\iota\varsigma$ (taksis). Epi “üzerinde”, taksi ise “düzgün sıralamak” manasındadır. Çeşitli epitaksiyel büyüme yöntemleri vardır. Bunlardan birkaçı; buhar faz epitaksi (VPE), sıvı faz epitaksi (LPE), kimyasal buhar birikimi (CVD), MOCVD (44) ve MBE ‘dir (26). Biz bu bölümde MBE yöntemiyle ilgileneceğiz.

4.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

Yüksek kalitedeki ince filmlerin kristal alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmesi için kullanılan bir kristal büyüme tekniğidir. Yani Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yönteminde molekül demetleri kullanılarak, tek kristal alttaş üzerinde, alttaşın yönelimini tekrarlayarak, düzgün sıralanmış tek kristal tabakalar büyütülür.

MBE tekniği, kristal büyüme teknikleri içerisinde en mükemmelidir. MBE’nin diğer yöntemlerden farkı, büyüme işleminin çok daha temiz koşullarda gerçekleşmesi, ultra yüksek vakuma ulaşılabilmesi (10^{-10} - 10^{-11} mbar), demet akılarının (büyüme oranlarının) ve alttaş sıcaklığının kontrol edilebilmesidir. Monotabaka boyutunda büyüme kontrolüne sahiptir. Böylece oldukça temiz koşullarda (ultra yüksek vakum), belirgin arayüzeylere sahip $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ gibi farklı yarıiletken malzemeleri tabaka tabaka üretilebilir ve tabakaların katkılanması kontrol edilebilir. MBE ile gelişmiş optoelektronik cihazlar, yüksek mobiliteli transistörler (HEMT) injeksiyon lazerler, LED’ler, gibi yüksek kaliteli bileşik yarıiletkenler büyütülebilir.

4.1.1. Yüksek vakumlu ortamdaki ışıklardan ince film büyütülmesi

Yüksek vakumda kullanılan ince film büyüme teknikleri, örneklerin kaynaklardan taban numunesine fiziksel veya kimyasal olarak taşınmasına göre ikiye ayrılır. Fiziksel kaplama tekniklerinde (PDT), büyütülecek bileşik veya bileşiği oluşturan maddeler çok yüksek derecelerde buharlaştırılır ve kimyasal bir

değişikliğe uğramadan termal enerji ışınları veya buhar şeklinde taban numunesine doğru vakum reaktörü ile taşınır. Kimyasal kaplama tekniklerinde (CDT) filmi oluşturan elementlerin madde parçaları ilk önce vakum reaktörünün içinde veya dışında oluşturulur ve buhar kaynakları şeklinde veya katmanlar olarak reaktörün içinden geçerek taban numunesinin yakınlarındaki reaksiyon bölgesine taşınırlar. Bu gaz halindeki madde parçaları bundan sonra reaksiyon bölgesine yakın bir yerde kimyasal reaksiyonlara girerler veya ısısal olarak birbirlerinden ayrılarak taban numunesinin yüzeyindeki kristallerin üzerinde filmin büyütülmesini sağlayan reaksiyona giren maddeleri oluştururlar. Bu kaplama durumları en iyi bir şekilde MBE tekniği ile yapılabilmektedir(40).

MBE yöntemiyle yarıiletken filmlerinin büyütülmesi, ultra yüksek vakum koşulları altında uygun sıcaklıkta tutulan kristal alttaş yüzeyi ile büyütülmek istenen malzemeye ait elementlerin moleküler demetleri arasındaki reaksiyon ile oluşur. İçinde kaynakların bulunduğu ısıtılmış efüzyon hücrelerinde moleküler demetler oluşturulur. Efüzyon hücreleri alttaş yüzeyine doğru hedeflenmiştir ve moleküler demet akısı, efüzyon hücrelerinin sıcaklığının kontrol edilmesiyle ayarlanır. Efüzyon hücrelerinden çıkan moleküler demetler kontrollü olarak büyütülecekleri ısıtılmış yarıiletken alttaşa doğru doğrusal bir yolda hareket ederler. Moleküler demetlerin çıkışına izin vermek ya da engel olmak için, her bir kaynağın kendine ait dışarıdan kontrol edilen bir kesicisi vardır. Kesiciler saniyenin onda biri kadar bir zamanda açılır ve kapanır. Bu süre, bir atomik tabaka kalınlığındaki keskin arayüzeyler ile sonuçlanan tipik 1-2 monotabaka/s'lik MBE büyüme hızından oldukça kısadır(40).

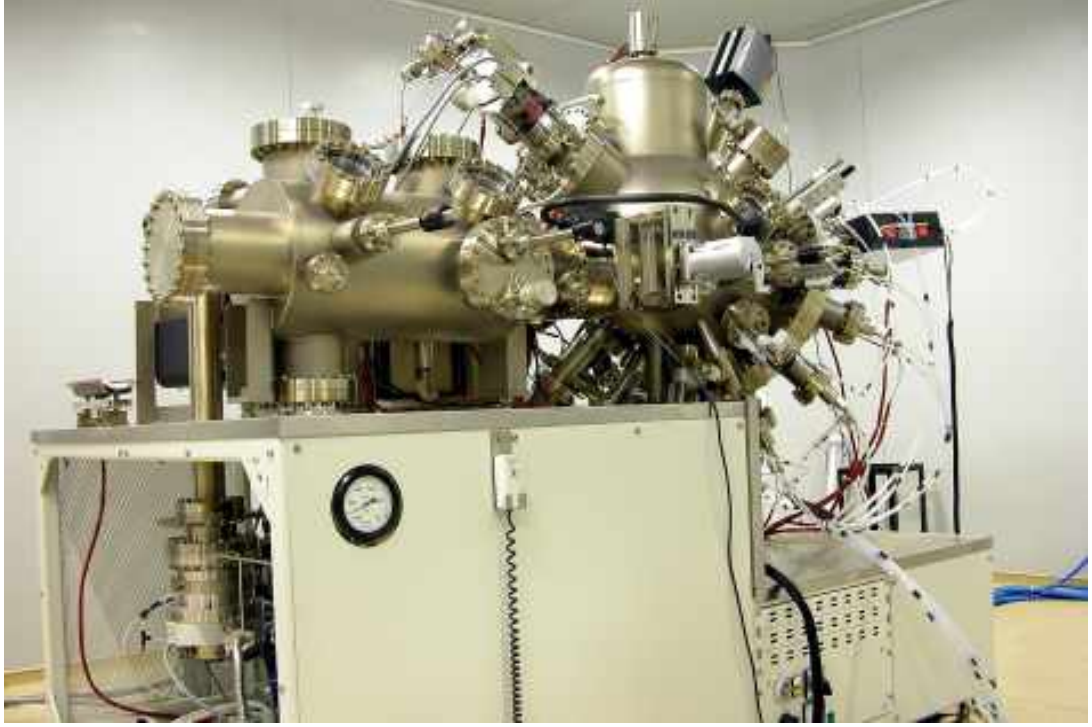
GaAs gibi III-V grubu yarıiletken bileşiklerinde, ısıtılmış yüzeye çarpan bileşen elementlerinden biri diğerine göre yüzeyden daha hızlı uzaklaşabilir. Bu nedenle MBE ile teknolojik kalitede III-V bileşiklerini meydana getirmek için grup III ve grup V elementlerine ait olan moleküllerin demet akıları birbirinden farklı olmalıdır. Kinetiksel olarak kontrol edilen MBE büyütmesi, yüzeyden salınma, yüzeyde göç etme, yüzeye tutunma ve bileşen atomlarının alttaş kristal örgüsüne dahil olması gibi bir dizi olay içerir. GaAs büyütmesini ele alalım. Alttaşa çarpan As_2 molekülleri önce alttaş yüzeyine zayıfça tutunurlar. Serbest yüzey $500\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerinde iken (Ga

atomlarının yokluğunda), As_2 çok küçük yapışma katsayısına sahiptir ve kolaylıkla yüzeyden buharlaşabilir. Yüzeye tutunan As_2 atomlarının bölünmesi ve daha sonra GaAs örgüsüne dahil olması sadece, yüzeyde göç ederken çiftlenmiş Ga örgü kenarlarıyla karşı karşıya geldiğinde meydana gelir. Bu şartlar altında büyüyen ince film alttaşın kristal yapısıyla benzer bir yapıya sahip olur. Böylece büyütülen GaAs tabakası epitaksiyeldir ve GaAs tabakasının büyütmesi sadece As türlerinin fazla akısına ihtiyaç duyar(41).

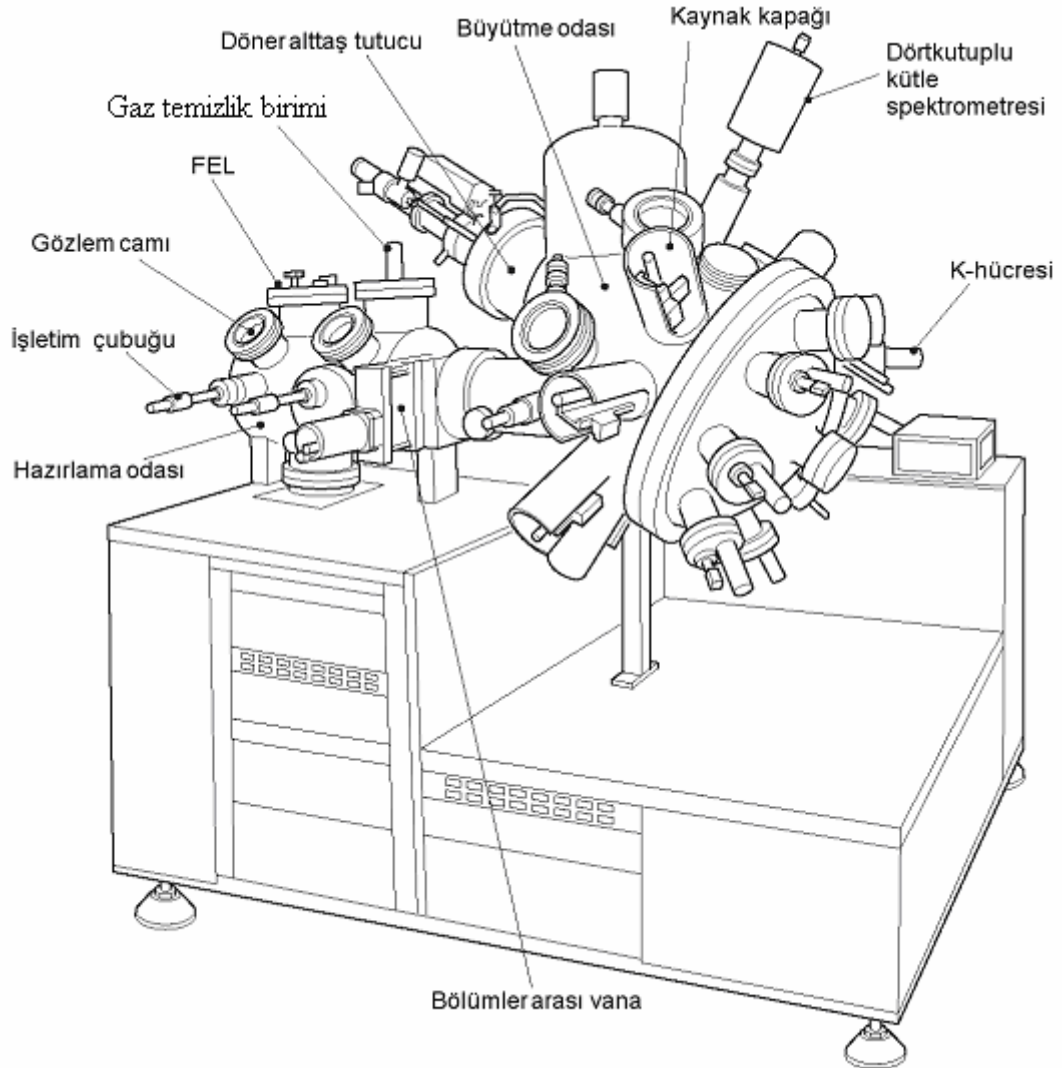
MBE'nin diğer vakum kaplama tekniklerinden farkı ışın akışının ve büyüme durumlarının daha doğru bir derecede kontrol altına alınabilmesidir. Diğer epitaksiyel büyütme tekniklerine göre MBE' nin kendine özel bir avantajı vardır: çok havasız bir vakum ortamında olduğundan dolayı, Yüksek Enerjili Elektron Kırınım Yansıması (RHEED) , Auger Elektron Spektroskopisi (AES), ellipsometri veya optik yansıma-kırınım ve lazer interferometrik metotları gibi yüzey teşhis metotları kullanarak malzeme büyütme esnasında kontrol altına alınabilir. Kontrol ve analiz için kullanılan bu güçlü teknikler MBE'deki tahmine dayalı varsayımların bir çoğunu yok eder ve bu büyütme tekniğini kullanarak üstün alet yapılarının imal edilmesine imkan sağlar(40).

4.2. V80H-10 MBE Sistemi

Gazi Üniversitesi Yarıiletken İleri Araştırma Laboratuvarlarında (STARLAB) yarıiletken ince film üretilen sistem, VG Semicon firması tarafından üretilen V80H-10 MBE sistemidir.



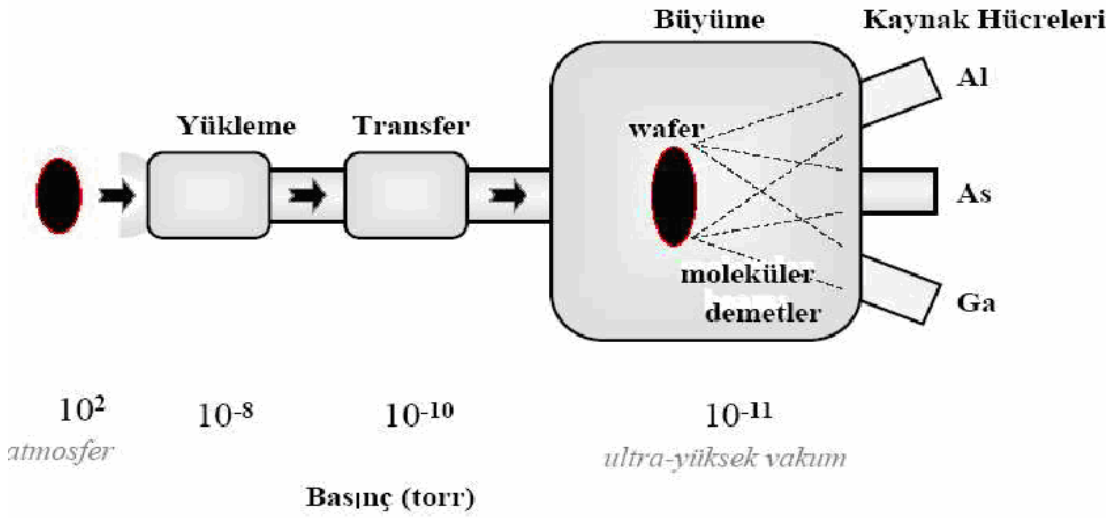
Resim 4.1 Gazi üniversitesi STARLAB’da bulunan VG80H MBE modeli



Şekil 4.1 VG80H MBE modeli(42)

Resim 4.1 ve Şekil 4.1’de Gazi Üniversitesi Starlab’da bulunan MBE modeli gösterilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi V80H-10 MBE sistemi; hızlı giriş kilit mekanizmalı hazırlama odası, park devresi (tercihe bağlı), gaz atma devresi (tercihe bağlı), transfer mekanizması, büyütme odası, kontrol paneli ve bu sistemlerin bağlandığı bilgisayar sisteminden oluşur. Büyütme odası ve hazırlama odası ultra yüksek vakumda (UHV) çalışır (Büyütme odasında 3×10^{-11} mbar, hazırlık odasında $\sim 10^{-10}$ mbar ve yükleme odasında $\sim 10^{-9}$ mbar’lık basınçlara kadar incek pompa sistemleri vardır) ve pişirme (bake-out) bölgesindedir. Büyütmek istediğimiz malzeme yüzeyinde bulunan boş bağların farklı atomlarla bağ yapmaması için bulunulan ortamda yabancı atomlar olmaması gerekir. UHV ortamında yabancı

atomlar bulunmaz böylece malzeme yüzeyinin yüzey bileşeni, UHV sayesinde, büyütme sırasında değişmeden kalacaktır. UHV da bulunan malzemeler ısıtılmaya ve düşük buhar basıncına dayanıklı olmak zorundadır. Cam malzemeler düşük gaz iletimi ve iyi vakum karakteristiği gösterdiği için UHV için çoğunlukla cam malzemeler kullanılır. UHV ortamı sürtünmeyi azaltarak, ısısal yalıtımı sağlayarak, buharlaşmayı artırarak, büyüme sırasında meydana gelen safsızlıkları azaltarak veya tamamen ortadan kaldırarak büyüme için uygun olan temiz ortamı sağlar.



Şekil 4.2. MBE 'de ultra yüksek vakum ortamının modellenmesi(43)

Numunenin sisteme alındığı ilk oda beş adet numune konabilecek bir asansörlü kasete sahip olan yükleme odasıdır(FEL). FEL, hazırlama odasından bir vana yardımıyla izole edilir. Altaşlar kasete yüklendiğinde, kapı kapatılır ve FEL pompalanır. Aynı anda birçok altaşın transferi için kasetliğin kullanımı, UHV sisteminin atmosfere daha az maruz kalmasını sağlar. Yükleme odası 500 l/s'lik turbo moleküler pompa yardımıyla vakumlanmaktadır. Böylece bu odada $\sim 10^{-9}$ mbar'lık basınca kadar inilebilmektedir. FEL'e yerleştirilen numuneler asansör yardımıyla hazırlık odasına geçirilir. Burada kaset kaldırma mekanizması kasetliği kaldırmak/indirmek ve hazırlama odasına sokmak/çıkarmak için kullanılır. Kaldırılmış pozisyonda, FEL'i hazırlama odasından yalıtır(42).

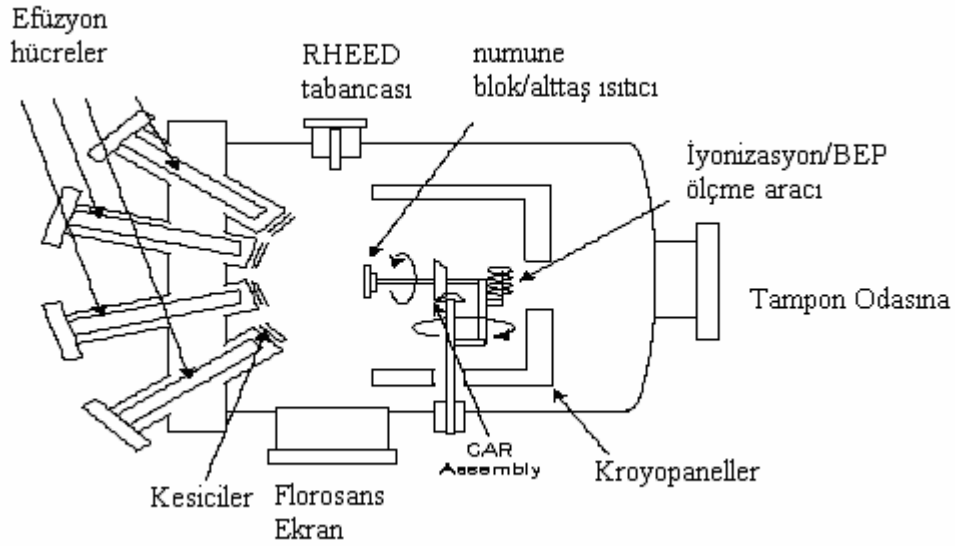
Hazırlama (tampon) odasında; transfer mekanizması, altaşı transfer aşamasına götürmek ya da buradan almak için hareketli manevra kolu, hızlı giriş kilidi (FEL)

park devresi ve gaz atma devresi yer alır. Numune tampon odasında bulunan bekleme yerine alınarak, 450°C ' ye kadar ısıtılır ve böylece ilk gaz temizliği burada yapılır. Bu oda 300 lt/s 'lik bir iyon pompasıyla vakumlanmaktadır. Böylece bu odada $\sim 10^{-10}$ mbar'lık basıca kadar inilebilmektedir.

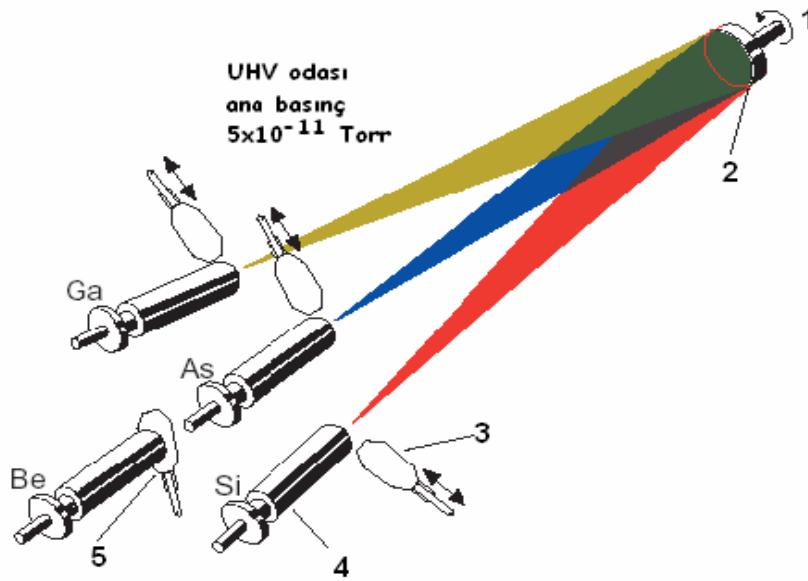
Büyütme odasında: alttaşa manevra yaptırmak için alttaş manipülatörü, hareketli manevra kolu, kaynak hücreleri, kapaklar, RHEED, kalıntı gaz analizi için 4-kutuplu kütle spektrometresi, görüntülü iyon ölçeri (MIG, Monitoring Ion Gauge) yer alır. Bu oda, titanyum sublimleşme pompaları, bir cryo pompa ve bir 500 l/s ' lik iki iyon pompası ile vakumlanmaktadır. Böylece bu odada 3×10^{-11} mbar'lık basıca kadar inilebilmektedir.

MBE sisteminin kontrolü PC ile IBM OS/2 işletim sistemi ile yapılır. Sistem bilgisayarı ile birleşik olan Euroherm PC300 işlem kontrolcüsü ile kapak açılması ve kapatılması, ısıtıcı sıcaklıkları, ve alttaş malzeme döndürülmesi görüntülenir ve kontrol edilir. Bu sistem sayesinde yükleme hazırlık ve büyütme odalarındaki basınçlar görüntülenebilir ve akı kalibrasyonları tamamlanır(42).

Büyütme odası MBE sisteminin en önemli bölümüdür. Son derecede temiz bir ortamda epitaksiyel büyütmeyi sağlayan bütün elemanlar buradadır. Şekil 4.3(a)'da tipik bir büyütme odası ve burada yer alan elemanlar gösterilmiştir. Buradaki vakum araçları; iyon pompası, soğuk pompa, titanyum süblimleşme pompası, turbo moleküler pompa, yardımcı diyafram pompası, tekli sıvı azotla soğutulmuş soğuk panel ve iyon ölçeridir. Görüntüleme araçları; RHEED tabancası ve ekranı, hareketli iyon ölçer ve 4-kutuplu kütle spektrometresidir.



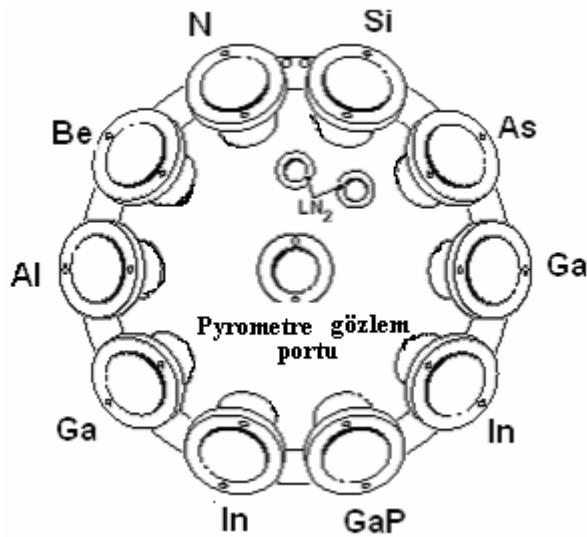
Şekil 4.3 (a) Tipik bir büyütme odası ve burada yer alan elemanlar



Şekil 4.4 Moleküler Demet Epitaksi prensibi;
 1. Altaş rotasyonu, 2. Isıtılmış altaş, 3. Yumuşak hareketli kapak,
 4. Moleküler demet kaynağı, 5. Kapak (kesici) ile bloke edilen demet

Şekil 4.4 'de Moleküler Demet Epitaksi prensibi gösterilmiştir. Büyütme odasında bulunan K-hücre "Knudsen – hücre" dizaynındaki moleküler demet kaynaklarının bulunduğu büyütme kaynak hücreleri ile büyütülmüş filmi meydana getiren bileşen elementler üretilirler. K-hücreleri uzun süreli sıcaklık kararlılığına, hızlı tepki zamanına ve düşük gaz atımına sahiptir. Bu standart K-hücreleri Alüminyum kaynak

için kullanılır. K-hücreleri (demet akısı hücre sıcaklığına göre gerçekleştiği için 1300 °C' lik ya da daha düşük sıcaklıklarda çalışılırken) yeterli demet akısını sağlayacak malzemeler için uygundur. Örneğin As fazla basıncı ile GaAs büyütülürken, 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ büyüme hızına yaklaşık 1050 °C'lik Ga K-hücre sıcaklığı ile ulaşılır. Galyum ve İndiyum için efüzyon kaynak 80 cc Pyrolitik Boron Nitrat (PBN) potalardan meydana gelir. Bu Thermohücre(termocell) uzun süreli kararlılığı ve düzenliliği sağlar, akı değişimindeki azalmayı engeller. Tüm hücreler birbirinden bağımsız olarak ısıtılabilir. Standart GrupV hücreleri 150 cc' lik kapasitede PBN potalara sahiptir. V80H-10 sistemi 10 hücreden oluşur. Bu hücrelerin yerleri isteğe bağlı olarak değiştirilebilir. Arsenik kaynak için kıran hücre (cracker cell) kullanılmaktadır. Hücre 750 cc' lik As deposuna sahiptir. V80H-10 sisteminde RF-plazma kaynağı da vardır. Bunun nedeni III-Nitrat büyütülmesine imkan sağlamak amacıyla atomik azot üretimidir. Si kaynak n-tipi ve Be kaynak ise p-tipi yarıiletken büyötmek için kullanılmaktadır. Şekil 4.5'da Gazi Üniversitesi STARLAB'da bulunan MBE sisteminin büyüme odasında kullanılan K-Hücre dizilimi gösterilmiştir.

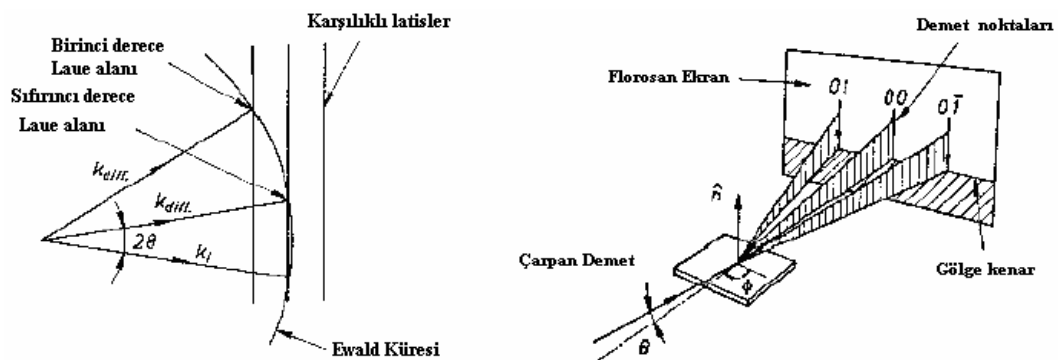


Şekil 4.5 STARLAB'ta kullanılan K-Hücre dizilimi

K-Hücre Kesicileri (shutter); yumuşak hareketlidirler, kaynak ile alttaş arasında yer alırlar ve molekül akısını keserler. Alttaş manipulatörüne (ısıtıcı devresine) alttaş, yerleştirilir. Alttaş ısıtıcı yardımıyla ısıtılır. Sıcaklık ısılıçift (thermocouple) yardımıyla ölçülür. Gerçek numune sıcaklığı, yansıyan radyasyonun MBE kontrol

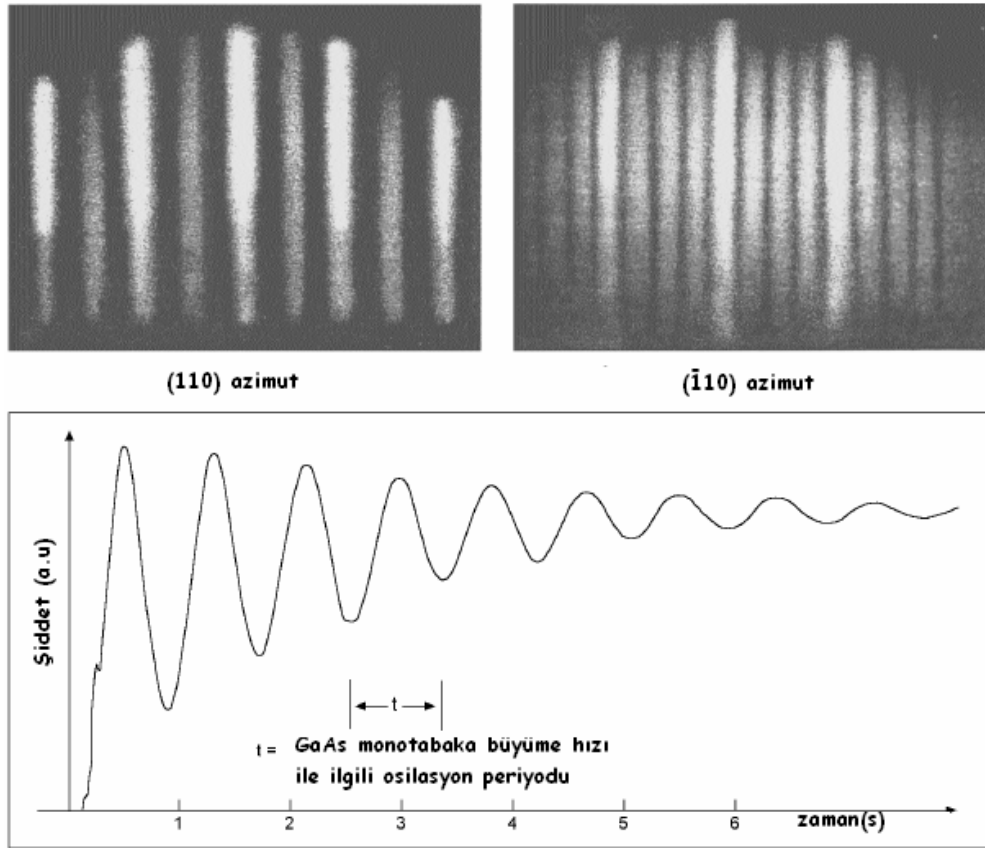
panelindeki Eurotherm PC300 kontrol sistemi yardımıyla ölçülmesi ile elde edilir. Normal büyütme sıcaklığında, gösterilen sıcaklık gerçek alttaş sıcaklığından 120-150 °C farklı olabilir. Gerçek sıcaklık, optik pyrometre ya da RHEED geçiş sıcaklıklarının görüntülenmesi ile elde edilebilir. Alttaş kendi eksenine etrafında 100 rpm'e kadar dönebilir. Döndürme işlemi, bilgisayar kontrollü ya da manuel bir şekilde yapılır. Herhangi bir moleküler demette, akı yoğunluğu hakkında bilgi sahibi olmak için büyütme odasına uygun bir gözetim iyon ölçeri (monitoring iyon gauge, MIG) yerleştirilir. Bu iyon ölçer, moleküler demetin içine doğru hareket eder(42).

Bu sistemler arasında en değerli ve karmaşık olan Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı (Reflection High Energy Electron Diffraction, RHEED)'dir. RHEED sistemi, güç kaynaklı bir elektron tabancası ve RHEED deseninin gözlemlendiği kapaklı bir fosfor ekrana sahiptir. Bu teknik yüksek enerjili (20 Kev' varan) elektron demeti kullanır. Bu elektron demeti doğrudan örnek üzerine gider ve bir kaç derecelik açıyla örnek üzerini tarar. Bir kaç derecelik açıyla yüzey üzerine gelen elektronlar simetrik olarak yerleştirilmiş floresans ekran üzerinde kırılma desenleri oluşturur. RHEED malzeme yüzey kalitesinin büyütülmeden önce, büyütülme sırasında ve sonrasında incelenmesi için hızlı ve güçlü bir tekniktir VG Semicon sistemlerinde RHEED için 15 keV'luk elektron tabancası kullanılır. Bu MBE sistemi için oldukça üstün bir özelliktir(40, 44).

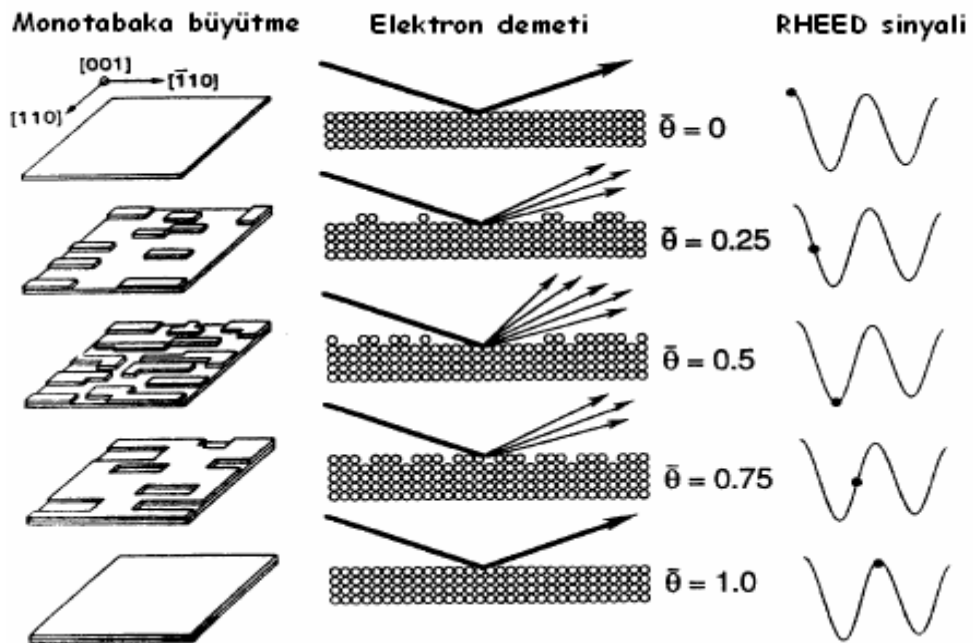


Şekil 4.6 RHEED elektron demetlerinin örnek üzerinde kırıldıktan sonra floresan ekran üzerine düşmesi

Şekil 4.6'ya bakarsak RHEED desenlerinin temelini anlayabiliriz. Eğer elektronlar yalnızca mükemmel düzlükteki ve düzenli olan birinci atomik tabakayla etkileşirlerse üç boyutlu karşılıklı örgü noktaları paralel sonlu çubuklara dejenere olurlar. Sonuçta Ewald küresinin Ewald yapısıyla kesişmesi (tipik RHEED enerjileri için bu kürenin yarıçapı çubuklar arası boşluktan çok daha küçüktür) yarım daire üzerine yerleşmiş bir dizi noktadan oluşur. Gerçekte termal titreşim ve örgü kusurları sonlu kalınlığa sahip zıt örgü çubuklarının oluşmasına sebep olur. Bu zıt örgü çubuğu oluşumu elektron demetinin termal titreşimler ve örgü kusurlarıyla etkileşerek saçılması ve ayrışmasından kaynaklanır. Bu zıt Ewald örgü çubukları Ewald küresi sonlu bir kalınlığa sahipken oluşur. Sonuç olarak elektron demeti mükemmel bir düz yüzeyden kırılma desenleri noktalardan daha fazla yoğunlukta ayarlanmış bir dizi saçılma deseni çizgileriyle sonuçlanır. Eğer yüzey düz değilse birçok elektron yüzey projeksiyonu oluşturur ve farklı doğrultularda saçılırlar. Bunun sonucu olarak RHEED deseni birçok benekten oluşacaktır. RHEED'in saydığımız bu özelliklerinden dolayı amorf bir yüzeyden (yarıiletken üzerindeki oksitlenme gibi) elektron demetinin kırılması kırılma deseni vermez, ekranda yalnızca dağınık görüntüler oluşur. Bu özellik sayesinde bir kristal büyütülmeden önce fırınladıktan sonra üzerindeki oksitlenme kalıntılarının ne durumda olduğunu belirlememizi sağlar. (100) GaAs için tipik RHEED desenleri , osilasyon ve monotabaka büyütülmesi sırasındaki RHEED Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Burada dikkat etmemiz gereken yer tam yansımanın en parlak benek etrafındaki düzensiz çizgilerin yoğunluğu her iki açıda periyodik olduğudur.



Şekil 4.7 RHEED desenleri ve osilasyon



Şekil 4.8 Monotabaka büyütülmesi sırasında RHEED sinyali

Şekil 4.7 'de As_4 akışı altında Ga ve Al kaynakları açıldıktan sonra (2x4) GaAs yüzeyinin 2x yönelimindeki tam yansıma beneklerinin yoğunluğunu gösteriyor. Her iki durumda da statik durumlara bağlı olarak başlangıçta yoğunluk azalır ve kaynaklar tekrar kapanana kadar yoğunluğun düşmesiyle periyodik titreşimler başlar. Titreşimlerin kökeni Şekil 4.8 'de gösteriliyor. Eğer başlangıç yüzeyi mükemmel derecede düzse nispeten tam yansıma benekleri daha fazla olacaktır. Tabaka üzerine tabaka büyütölmeye başladığı zaman şekillenen monotabaka üzerinde oluşan ada adımları yüzünden yüzey üzerine gelen elektron demetleri saçılacaktır bunun sonucu olarak tam yansıma yoğunluğu düşecektir. Monotabakanın oluşumu yarıldığı zaman saçılma maksimum olur. Yeni düz mono tabaka adaların birleşmesi ile oluşur. Adalar tekrar birleşip tabakayı oluşturduğunda yansıma yoğunluğunun değeri tekrar eski haline gelir(9).

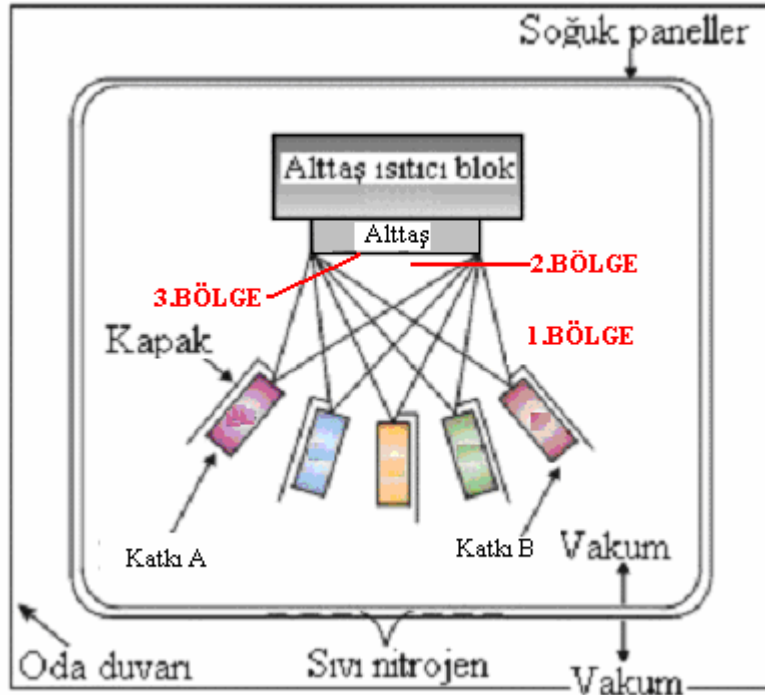
4-Kutuplu kütle spektrometresi (QMS); büyütme odasına yerleştirilmiştir;artık gaz analizi ve kaçak deteksiyonu için kullanılır(42).

4.2.1. MBE vakum odasındaki fiziksel olaylar

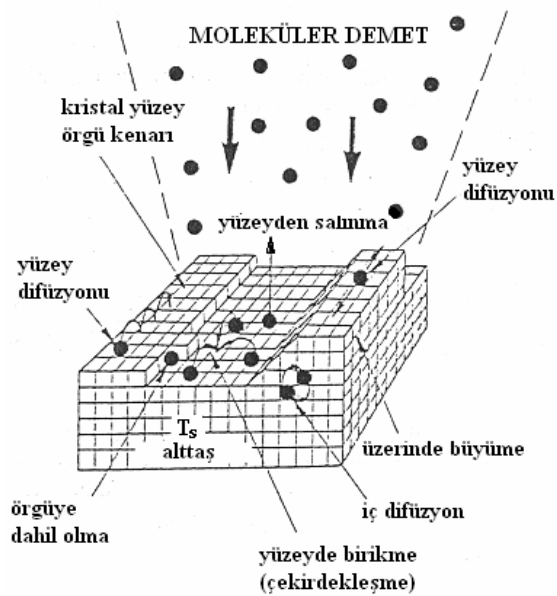
MBE'nin bölümleri kısaca tanıtıldı. Şimdi MBE vakum odasındaki fiziksel olaylara göz atalım. MBE vakum odasını üç temel bölgede inceleyebiliriz. Birinci bölge; moleküler ışın demetlerinin oluştuğı üretim bölgesi, ikinci bölge, farklı kaynaklardan gelen moleküler demetlerin bulunduğu ve buharlaşan elementlerin karıştığı bölge ve üçüncü bölge ise, kristalleşme bölgesidir (44,45).

Şekil 4.9 'de de göröldüğü gibi birinci bölgedeki moleküler demetler, sıcaklığı doğrulukla kontrol edilen Knudsen-Efüzyon hücre tipindeki kaynaklardan UHV koşulları altında oluşturulurlar. MBE vakum odasındaki ikinci bölge, moleküler demetlerin kesiştiğı karışım bölgesidir. Bu bölgede farklı elementlere ait moleküller arasında hiçbir çarpışma ve etkileşme olmaz; çünkü demetlere ait moleküllerin ortalama serbest yolları çok uzundur. günümüzde bu bölgede meydana gelen fiziksel olaylar hakkında çok az bilgiye sahibiz. MBE alttaş yüzeyindeki büyüme işlemi

üçüncü bölgede yani kristalleşme bölgesinde meydana gelir. Şimdi Moleküler demet yüzeye geldiği anda birikimin nasıl olacağına bakalım. Şekil 4.10' da bu birikimin bir modellemesi görülmektedir.



Şekil 4.9 MBE büyütme odasında fiziksel olayların meydana geldiği bölgeler



Şekil 4.10 MBE büyütmesi sırasında meydana gelen yüzey işlemleri (44)

Yüzeye gelen moleküler demetlerden belli bir kısmı yüzeye yapışmayıp yüzeyden ayrılacak, bir kısmı yüzey difüzyonu yani yüzeyde yayılma meydana getirecek, bir kısmı yüzeyde toplanma yani çekirdekleşme meydana getirecek, bir kısmı da yüzeyde birleşim meydana getirecektir. Bu seri yüzey işlemlerini maddeler halinde sıralayalım.

- Alttaş yüzeyine çarpan bileşen atom veya moleküllerin yüzeyde tutulması (adsorption).
- Yüzeyde tutulan moleküllerin yüzeyde değişik yerlere gitmesi (göçmesi, migration) ve birbirinden ayrılması (dissociation)
- Bileşen atomlarının alttaş kristal örgüsüne veya henüz büyütülmüş olan epitabakaya dahil olması.
- Kristal örgüye dahil olmayan türlerin termal olarak yüzeyden salınması (desorption)(44).

4.3. Büyütme İşlemine Başlanması

4.3.1. Alttaşın büyütme işlemine hazırlanması

Alttaş tutucusunun bir örneği Resim 4.2’de verilmiştir Alttaşları yerleştirmek için İndiyumsuz 2/4-inch, 2-inch ve 3-inch çaplı alttaş tutucuları gibi farklı tip alttaş tutucuları vardır. İndiyumsuz tutucu, alttaşları yerleştirmek için daha hızlı ve uygun bir metottur.



Resim 4.2 3-inch indiyumsuz alttaş tutucu: 1. alttaş ve 2. alttaş tutucu

Alttaş kasetliği beş alttaş tutucusunu aynı anda taşımak için dizayn edilmiştir. Kasetlik FEL'e yüklenir ve asansör mekanizması ile her bir alttaşı sisteme dahil etmek için aşağı ve yukarı hareket ettirilir. Alttaşlar, alttaş tutucularına yerleştirilir ve klips ile sabitlenir, FEL'de bulunan kasetliğe yüklenir. Başlangıçta alttaşların gaz atma işlemi burada yapılabilir. Daha sonra, kasetlik hazırlama odasına getirilir. Kasetlik doğru yükseklikte olduğunda, ilk alttaş hareketli manevra kolu ile kasetlikten alınarak, transfer mekanizması üzerindeki platforma koyulur. Transfer mekanizmasının el ile manuel olarak hareket ettirilmesiyle, alttaş düzeneği gaz atma ya a park devresine götürülür. Burada gaz atma işlemi tamamlandıktan sonra, transfer mekanizması tekrar gaz atma ya da park devresine doğru hareket eder ve işleme tabi tutulmuş olan ilk alttaş platforma yüklenir. Kullanıcı kolu çevirerek hazırlama odası ile büyütme odaları arasındaki geçiş vanasını açar. Geçiş vanası açıldığında, transfer mekanizması yardımıyla platform büyütme odasına girer. Büyütme odasının hareketli manevra kolu yardımıyla, alttaş platformdan kaldırılır, alıcıya koyulur ve alttaş, büyütme pozisyonuna yükseltilir. Şimdi transfer mekanizması büyütme odasından geri çekilir ve geçiş vanası kapatılır. Artık alttaş büyütme işlemine başlamak için hazırdır(42).

MBE 'de yüksek kalitede kristal büyütebilmek için öncelikle MBE' deki her üç oda da vakuma alınmalıdır. Ardından pişirme (Bake_out) işlemi yapılmalıdır. Yüksek kalitedeki büyütme koşullarına ulaşılabilmesi için, odadaki vakumun mümkün olduğunca temiz olması gerekmektedir. Sistemin fırın panelleriyle sarılması ve oda duvarlarındaki safsızlıkların yüzeyden uzaklaştırılması için 200 °C'ye kadar düzenli olarak ısıtılması ile çok yüksek saflıktaki vakuma ulaşılır. Hücreler, pişirme sıcaklığından 30 °C daha sıcak çalıştırılır ki odadan gelen safsızlıkların hücrelere girmesi engellenmiş olsun. Uygun bakeout zamanı 72 saattir. Bakeout işleminden sonra sistem 6 – 12 saat kadar sürede 50°C' nin altına soğutulur. Pişirme işleminden sonra gaz çıkışı (outgas) gerçekleştirilir. Bütün outgaz işlemi boyunca basınç 10^{-7} mb' dan küçük tutulmalıdır. Kütle spektrumu sonuçları outgaz işlemi boyunca düzenli olarak alınmalıdır. Sisteme çok yüksek saflıkta azot gazı (N₂) verilerek sistem atmosfere açılır. Sisteme çok yüksek saflıkta azot gazı (N₂) gönderilmesinin nedeni sistemi atmosfere açtığımızda atmosferdeki tüm gazlar içeri girebilir ve

içeride bulunanlar ile birleşebilir. Sistem temizliği bu yolla sağlandıktan sonra pota sökölerek içerisine Al, In, Ga ve diğer kaynaklar yerleştirilir büyütme odasındaki hücreler sökölüp, içerilerine potalar yerleştirilir. Sistem vakuma alınır, bake out yapılır, yüklü potalar (gaz temizliği (outgaz) işlemi yapılarak) temizlenir. Potalar dolu olduğunda outgaz işlemi sırasında büyütme odasındaki basınç 200°C ' de yaklaşık 4×10^{-7} mbar' a düşürülmelidir. Akılar ölçölür. Kaset içerisine alttaş yüklenip, yükleme odası saf kuru azot kaplatılarak temizlenir, FEL içerisindeki kaset yerleştirilip, yükleme odasına yerleştirilir. Bu oda tekrar vakuma alınır. FEL' deki alttaş outgaz yapılır. Numune hazırlık odasına transfer edilir. Bu odada alttaş 400°C ' ye kadar ısıtılarak, sahip olduğü oksit tabakası büyük ölçüde temizlenerek, büyütme odasına geçebilecek duruma getirilir. Büyütme odasının vanası açılır, alttaş manüplatöre transfer edilir. Ana vana kapatılır. Sisteme bağı bilgisayarlar büyütmeyi ve dört kutuplu kütle spektrometresini kontrol eder.

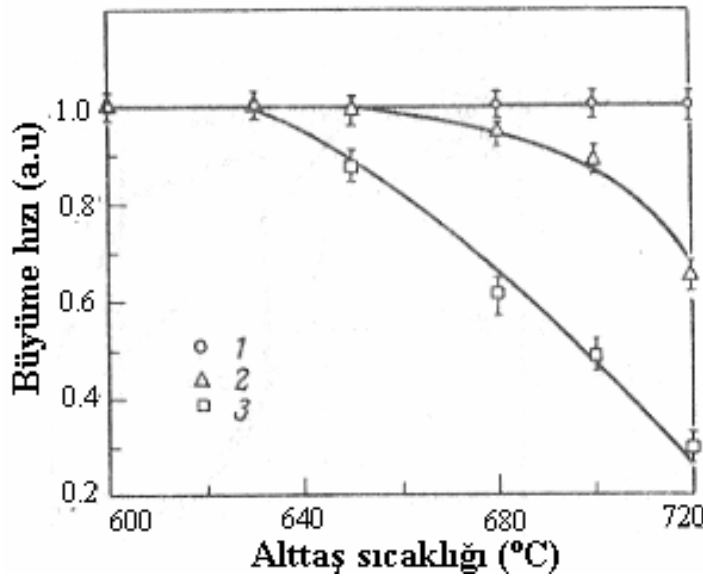
Çizelge 4.1 Potasız ve potalı hücre maksimum çalışma sıcaklıkları

Hücre Tipi	Geniş As hücresi(su soğutulmadan)	Termohücre (80cc)	Dimer kaynak bileşigi(80cc)	Standart K-hücre(40cc)
Maksimum çalışma sıcaklığı (potasız)	700°C	1230°C	1230°C	1270°C
Maksimum çalışma sıcaklığı (potalı)	800°C	1350°C	1350°C	1100°C

4.3.2 GaAs tabakasının MBE'de büyütölmesi

Büyümenin başlayacağı alttaş yüzeyi oksitlerinden arındırılmış yeterli temizliğe ulaşmıştır. Normal büyüme koşulları altında (G.R~ $1\mu\text{m/h}$) $\sim 480^{\circ}\text{C}$ 'nin altında büyütölün GaAs yüksek dirençli olmasına rağmen, bu kadar düşük büyütme sıcaklıkları çok nadirde olsa kullanılır(46,47). MBE ile normal büyütme hızları için, ultra yüksek saflıkta, katkısız GaAs üretimi için büyütme sıcaklığı (T_s) $580-640^{\circ}\text{C}$ 'dir. MBE de yapılan çalışmalar sonucunda $T_s > 600^{\circ}\text{C}$ de büyütölün GaAs'da

(yüksek T_s) toplam derin seviye konsantrasyonu azalmıştır, $T_s \geq 550$ °C'de GaAs büyütmesinde ise malzemedeki toplam elektron tuzak yoğunluğunun düşmüştür. $T_s \sim 475$ °C'nin altına düşürüldüğünde ise yüksek yoğunluktaki kusurlar oluşur. Yüksek kalitedeki GaAs-AlGaAs tabakalarının büyütülmesi için $T_s \sim 640$ °C gereklidir(48). Şekil 4.10'de alttaş sıcaklığına göre AlAs, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ içindeki GaAs kısmının ve GaAs'ın büyüme hızlarının değişimi gösterilmiştir. GaAs ve $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütülmesi sırasında alttaş sıcaklığı arttırılırsa alttaşa gelen As akısısında artırılması gerekir. Ayrıca 640 °C'den düşük sıcaklıklarda büyüme hızı sıcaklıktan bağımsızdır. 640 °C'den yüksek büyüme sıcaklıklarında ise yüzeyden salınan Ga atomlarının oranı azalır ve bu da büyüme hızını etkiler. Böylece Ga'un yüzeye yapışma katsayısı bire yaklaşır. Yüksek sıcaklıklarda Al'un akısında meydana gelecek ufak bir değişim Ga'un yüzeye yapışma katsayısını artırır.



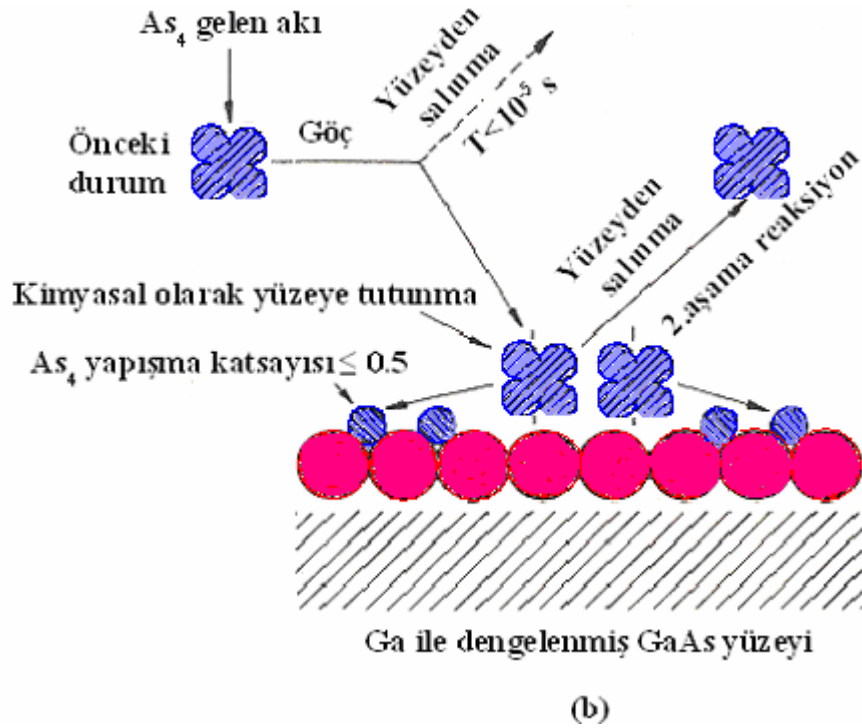
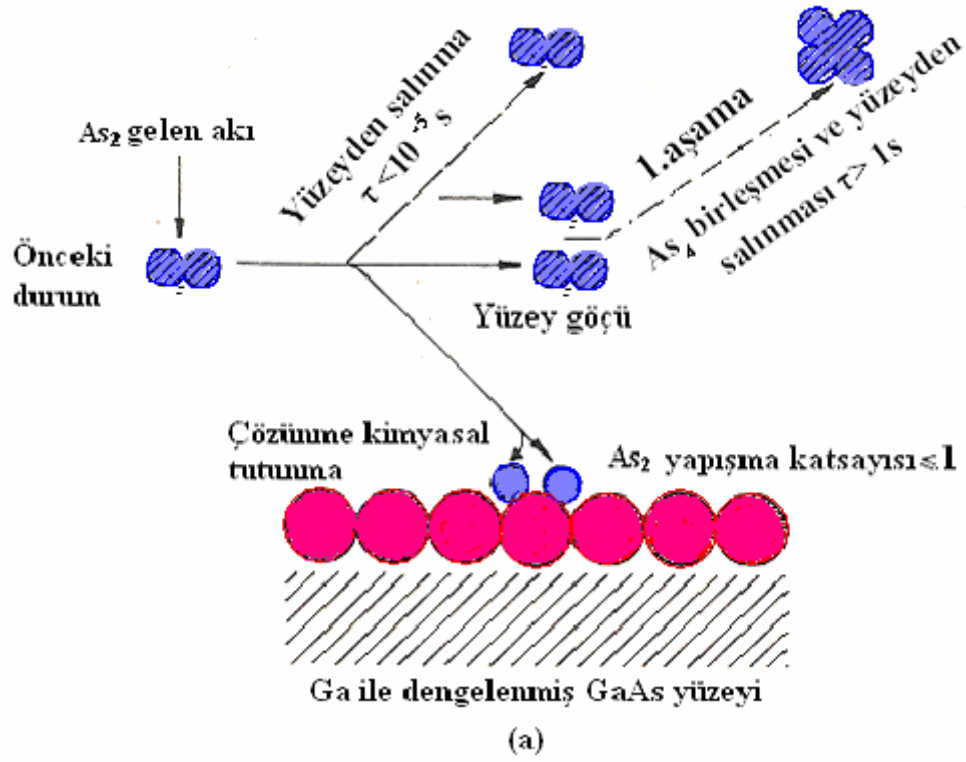
Şekil 4.11 GaAs için alttaş sıcaklığına göre büyüme hızının değişimi:

1. AlAs, 2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ içindeki GaAs kısmı, 3. GaAs(49)

Düşük büyütme sıcaklıklarında, gelen tüm grup III atomları (Ga), III-V alttaşa yada büyüyen filme yapışır sadece yeterli sayıdaki grup V atomları (As) III-V alttaşa ya da büyüyen filme yapışır ve büyümede artış sağlar. III-V bileşikleri uygun buharlaşma sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda kararsızdırlar. MBE'de GaAs büyütülmesinin temeli Foxon ve Joyce'un çalışmalarına dayanır. Şekil 4.12(a) ve

(b)'de Ga-As₄-(100) GaAs ve Ga-As₂-(100) GaAs yapıları gösterilmiştir. GaAs elementsel atomik Ga'un buharlaştırılması ve As₄ formundaki elementsel Arseniğin süblimleştirilmesi ile hazırlanır. Ga ve As₂'den GaAs büyütülmesi As₂ molekülünün tek Ga atomları üzerine kimyasal olarak yüzeye tutunması olayıdır. As₂'nin yüzeye yapışma katsayısı, Ga akısı ile orantılıdır, fazla olan As₂ yeniden buharlaştırılır böylece stokiyometrik GaAs büyümesi sağlanır. As₄ ve Ga'dan GaAs büyütülmesi süreci ise çok daha karışıktır. As₄ molekül çiftleri komşu Ga'lar ile tepkimeye girer. Ga fazlalığı meydana geldiğinde As₄ akısı salınır. As₄ için maksimum yapışma katsayısı 0.5'tir. $J_{As_4} > J_{Ga}$ 'dur ve As₄ moleküllerinin, diğer As₄ molekülleri tarafından işgal edilmiş komşu yerleri bulması yüksek olasılıktadır ve yüzeyden salınma oranı, sağlanan molekül sayısı ile orantılı hale gelir. Böylece büyütme işlemi yüzeyden salınma ve yüzeye tutunma ile gerçekleşir. Sıcaklık arttırıldıkça, As₂ yüzeyden salınma ile yok olur ve yüzeydeki Ga popülasyonu artar. RHEED ile yapılan yüzey analizlerinde şu görülür; düşük sıcaklıklarda ve yüksek As/Ga akı oranlarında As ile dengelenmiş (2x4) yüzey yapısı vardır. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük As/Ga akı oranlarında ise yüzey yapısı Ga ile dengelenmiş (4x2) yapısıdır(50,51,52)

AlGaAs gibi III_aIII_bV alaşımlarının büyütülmesi iki grup III atomunun yapışma katsayısının birleşmesiyle bulunabilir .Sonuç büyüme oranı ve bileşim ikili büyüme oranından basitçe türetilir. AlGaAs/GaAs heteroyapılarının MBE' de büyütülmesi oldukça kalitelidir. GaAs ve AlAs için örgü uyumu % 0,1' den daha iyidir. Bu nedenle bu iki materyalin tabakaları kalınlık sınırlamalarına gidilmeden herhangi bir bileşim miktarı için ardı ardına büyütülebilir. Büyütmenin birkaç kez onar saniyelik peryotlarla durdurulması arayüzeyde önemli bir pürüzsüzlüğü getirir. Bu pürüzsüzlük RHEED şiddetinin korunmasıyla anlaşılabilir. Yalnız durdurma ile oluşan arayüzey pürüzsüzlüğü sadece yeterince düşük Al kompozisyonları için oluşur, yüksek Al bileşimleri için, büyüme durdurulması AlGaAs yüzeyini düz yapmaz.

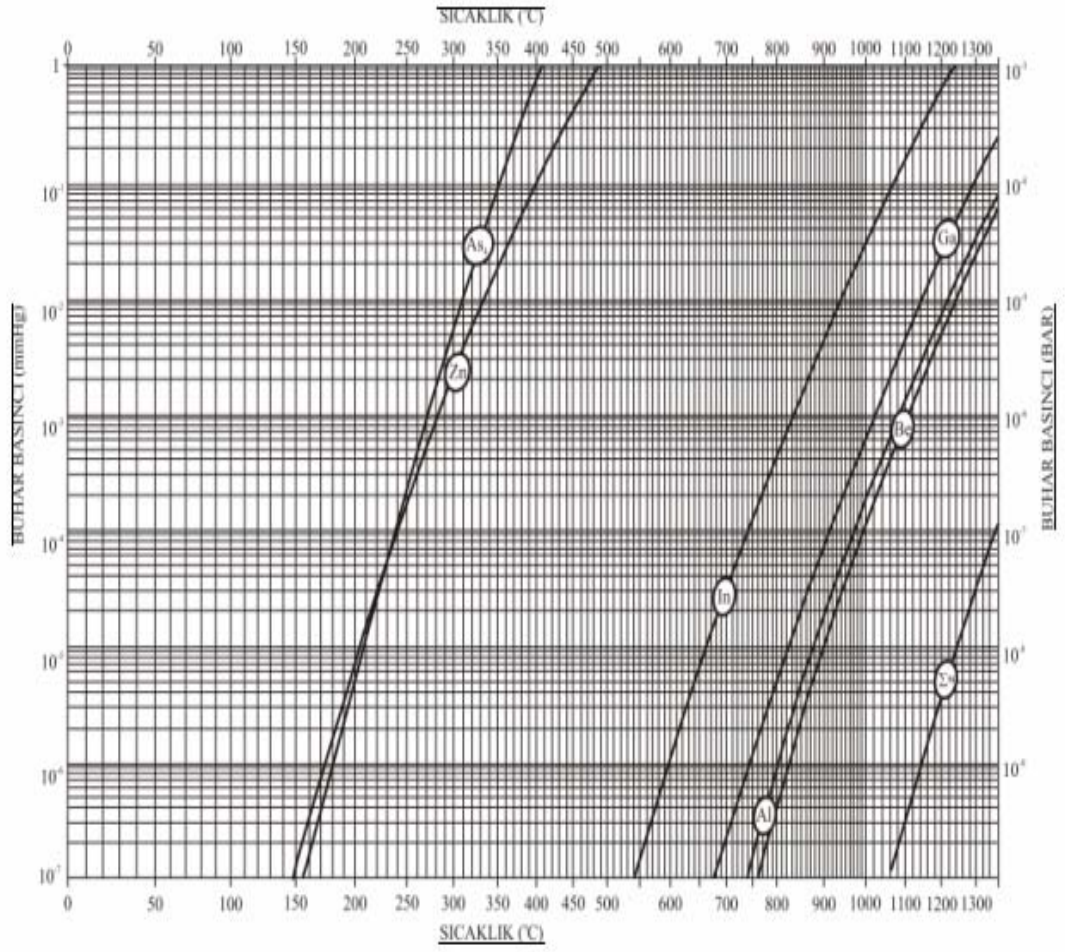


Şekil 4.12 (a) Ga ve As₂'den, ve (b) Ga ve As₄'ten GaAs büyütülmesi(44)

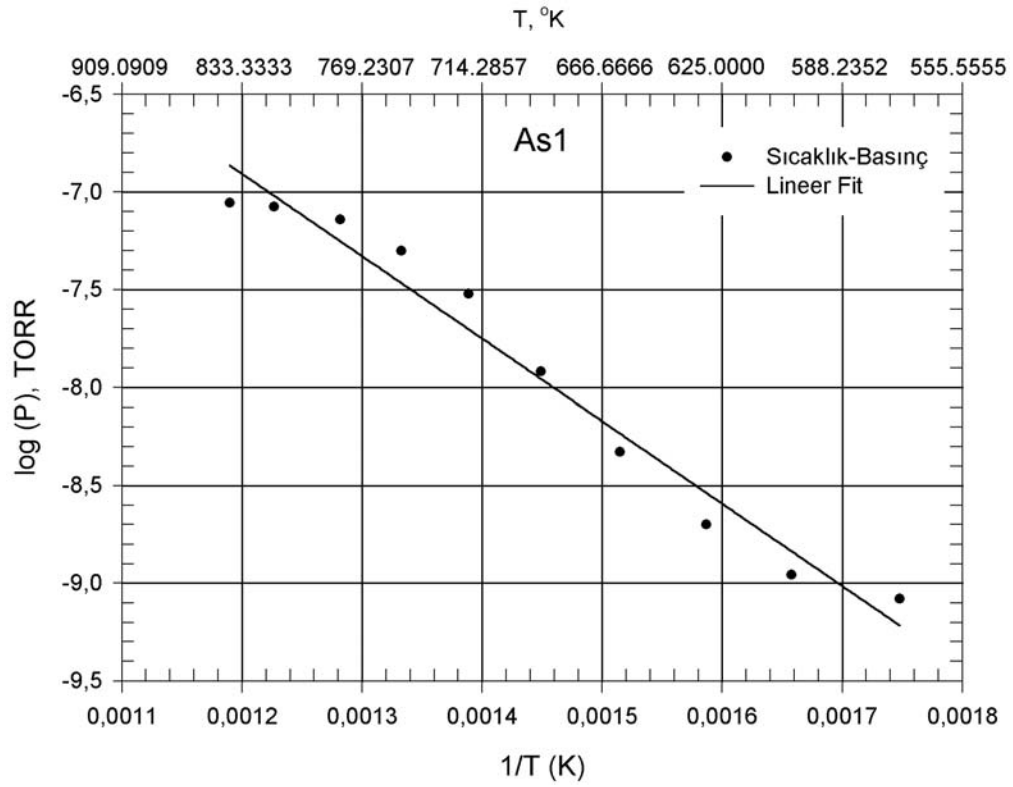
Optoelektronik cihazlardaki taşıyıcı geçişine olanak sağlayan yarıiletkenlerin katkılanması olayı MBE büyütmesinde yapılabilir. III-V yarıiletken kristalleri için MBE’de katkı atomları n-tipi için grup-VI, p- veya n-tipi için grup-IV (bu gruptaki elementler, yüzey kopmaları ve tekrar buharlaşma problemlerinden dolayı) n-tipi katkı elementi olarak fazlaca tercih edilmezler. Bu gruptaki atomlar eğer grup-III kenarlarına yerleşirlerse donör gibi, grup-V kenarlarına yerleşirlerse akseptör gibi davranabilirler. Fakat düşük buhar basıncına sahip olduklarından 2000°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda buharlaşırlar. Sn yüzey kopmasına yol açar ve Ge’un ikili davranışını kontrol etmek zordur. Bu nedenle en uygun n-tipi katkı maddesi Si’ dur. Bu malzeme GaAs yüzeyinde grup-III kenarlarına yerleşir ve katkı seviyesi 10^{19} cm^{-3} değerinin üzerinde elde edilebilir. $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ’ den daha yüksek katkı seviyelerinde yüzeye doğru yayılma gerçekleşebilir), ve p-tipi için grup-II (II-b(Zn, Cd) ve II-a(Be). Bu elementler içinde en uygun olanı Be’dur; çünkü Zn ve Cd büyütme sıcaklıklarında yüksek buhar basıncına sahiptir)dir.

4.3.3 Akı kalibrasyonu

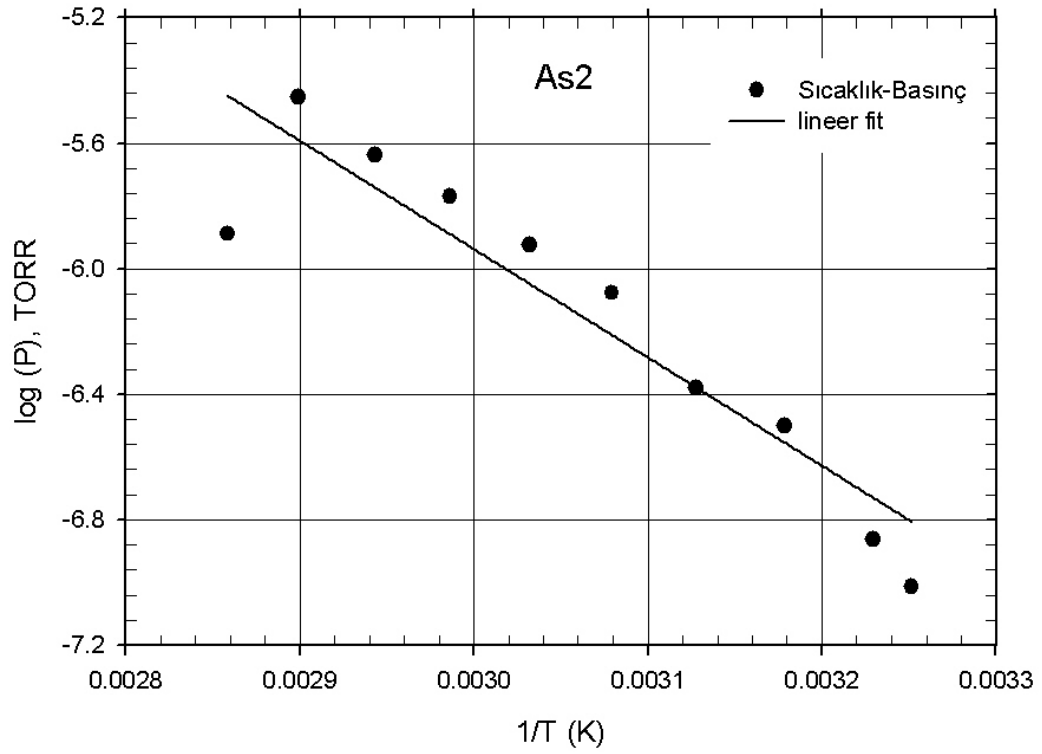
Elementlere ait basınç(akı) - sıcaklık eğrilerinden hangi sıcaklığa hangi basınç değerinin karşılık geldiğini bulabiliriz. Bu değerlerden faydalanarak istenilen moleküler demet akısı için uygun olan sıcaklık değerleri belirlenebilir. MBE’de kullanılan çeşitli elementlere ait basınç(akı) - sıcaklık değerleri Şekil 4.13’ de verilmiştir MBE’ de kristal büyütmeye başlamadan önce her kaynak elementine ait akı-sıcaklık kalibrasyonu, büyüme oranı kalibrasyonu ve katkı miktarı kalibrasyonu yapılmalıdır. Bu işlem için Al, Ga ve As₂ elementlerinin literatürde bulunan sıcaklık-basınç(akı) değişimleri baz alınarak hedeflenen bileşim oranı için uygun akı değerleri kullanılır. Akı (basınç) değerlerinin sıcaklık karşılığı; hücre sıcaklığı artırılarak (termal durum basıncını da dikkate alarak) “demetlere özgü basınç” ile sıcaklık değişimi elde edilir. Elde edilen değerler Şekil 4.14 a, b, c ve d’de gösterilir. Bu eğrilere göre istenilen demet akısına ulaşmak için kaynak hücrenin ısıtılma miktarı belirlenir.



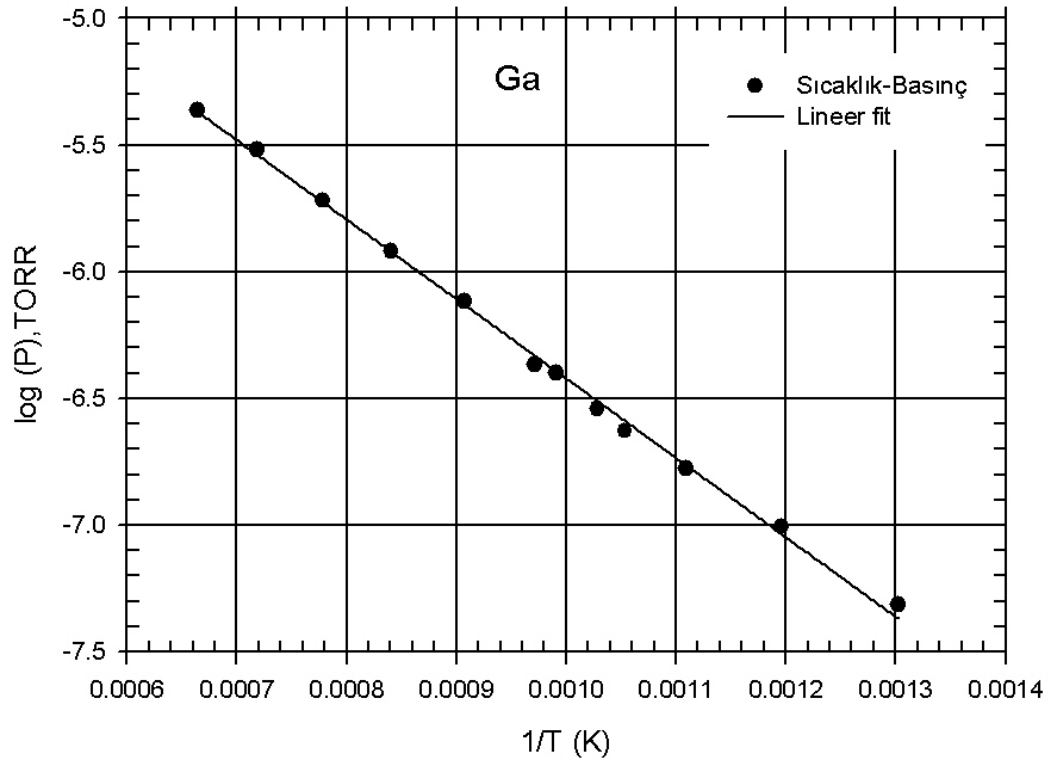
Şekil 4.13 III-V grubundaki bazı elementlerin Sıcaklık – Buhar Basıncı değişimi



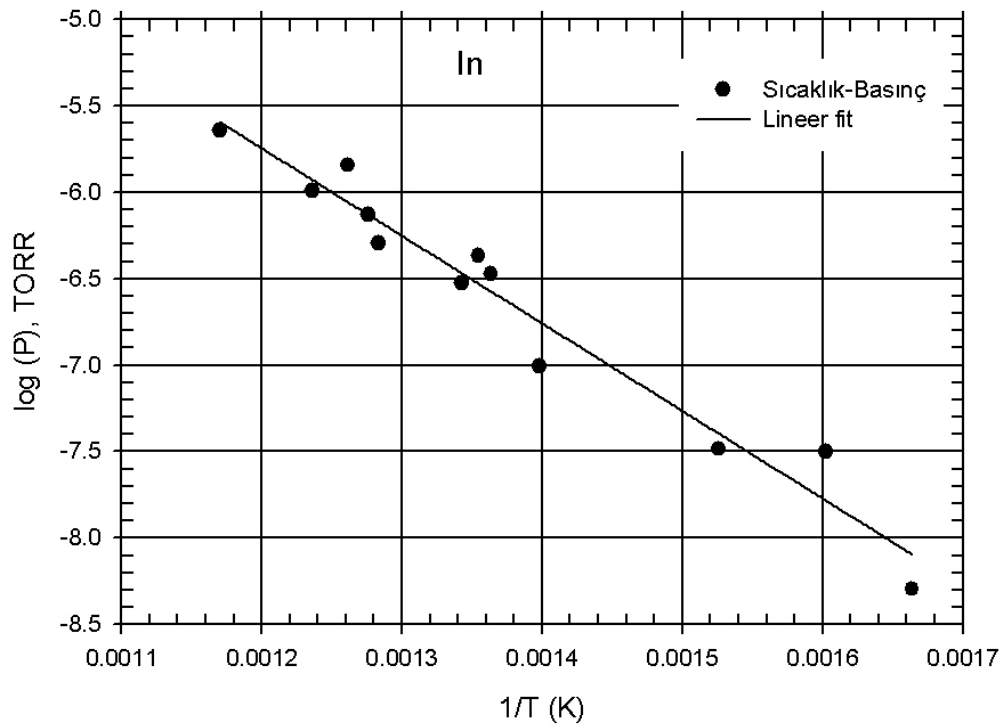
Şekil 4.14 (a) As₁ için Sıcaklık – Basınç eğrisi



Şekil 4.14 (b) As₂ için Sıcaklık – Basınç eğrisi



Şekil 4.14 (c) Ga için Sıcaklık – Basınç eğrisi



Şekil 4.14 (d) In için Sıcaklık – Basınç eğrisi

4.3.4 AlAs ve AlGaAs büyütülmesi

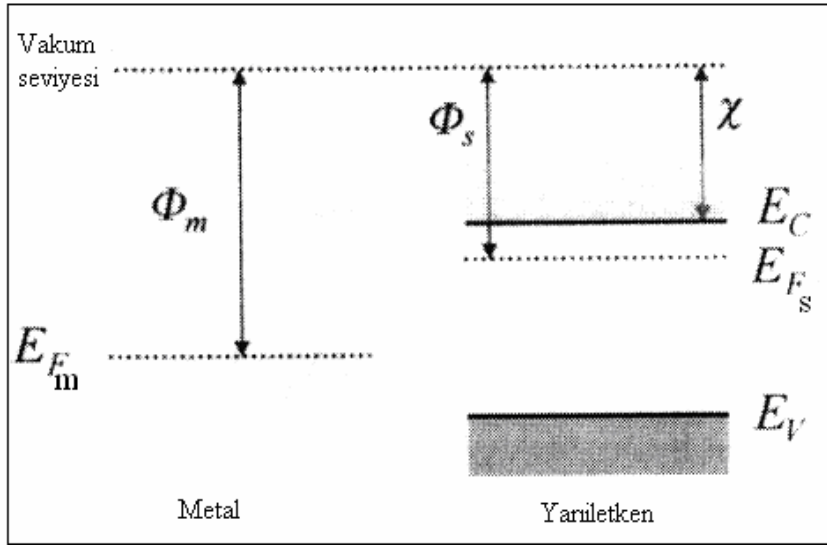
Geniş, indirekt bant aralığına sahip olan AlAs'a, MBE çalışanları tarafından çok az ilgi gösterilmiştir (53). Buna rağmen, AlAs direkt bant üçlü alaşım $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 < x < 0.4$) üretmek için, GaAs ile alaşım haline getirildiğinde, yarıiletken aygıtlar özellikle de GaAs-AlGaAs lazer için oldukça ilgi çeken bir malzeme haline gelmiştir. Al içeren bileşiklerin büyütülmesindeki ana sorun, bu bileşenin oldukça reaktif olmasıdır. Zayıf UHV koşullarında, MBE AlGaAs büyütme girişimi, artık gazlardan (CO , H_2O , O_2) gelen O ve C kirlilikleri yüzünden elektriksel ve optiksel özelliklerinin kötüleştiği bir adi malzeme ile sonuçlanır. Büyüme sırasında, elektron mobilitesi sıcaklığa oldukça bağlıdır. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \cong 0.3$) büyütülmesi için optimum sıcaklık ~ 700 °C'dir. Bu, morfolojik (54) ve fotoluminesans (55,56) çalışmalarına dayanmaktadır. En iyi elektriksel özellikler Morkoç ve arkadaşları tarafından (57), 630 °C'lik alttaş sıcaklığında rapor edilmiştir. Son zamanlardaki yükseltilmiş sıcaklıklarda AlGaAs büyütmesinde, üzerinde durulan problem, Ga'un tercihli yüzeyden salınmasıdır (49,58). Yüksek sıcaklıklarda, GaAs'tan Ga kaybı, sadece tabaka incelmesine neden olur, fakat AlGaAs durumunda tercih edilen kayıp, tabaka kalınlığına ek olarak alaşım kompozisyonunu da etkiler.

5. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON

5.1. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

Metal ve yarıiletken malzemelerin fermi enerjisi seviyeleri birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle metal ve yarıiletken malzeme kontak edilirse, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki bu farkın dengelenebilmesi için bantlarda bir bükülme meydana gelir. Fermi enerjileri arasındaki böyle bir farkın olması malzemelerden birindeki elektronların enerjisinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Kontak sonrasında malzemeler arasındaki termal denge kuruluncaya kadar, (her iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar) metal ve yarıiletken arasında difüzyon devam eder (67). Elektronların bu akışı, p-n eklemlerde meydana gelen yük akışına benzerdir. İşte bu tipteki eklemlere metal kontak (“metalurjik eklem”) denir (68). Metal/yarıiletken kontak oluştuğunda kontaklar malzemelerin iş fonksiyonlarına göre doğrultucu veya ohmik kontak olmak üzere ikiye ayrılır.

Bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjiye iş fonksiyonu denir. Ayrıca iş fonksiyonu vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı olarak da tanımlanabilir. Metal için iş fonksiyonu ϕ_m (eV) ile verilir ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna, $\phi_s = \phi_s + \phi_n$ eşittir (5). Buradaki ϕ_s değişken bir niceliktir çünkü; yarıiletkenin Fermi seviyesi katkı miktarına göre değişir. ϕ_s ise iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Vakum seviyesi referans seviyesi olarak kabul edilen katının dışında durgun olan bir elektronun enerjisini temsil eden uzay seviyesidir. ϕ_n ise iletkenlik bandı kenarı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Şekil 5.1’de metal ve yarıiletken malzemelerin kontak edilmeden önceki enerji-bant diyagramları gösterilmiştir.



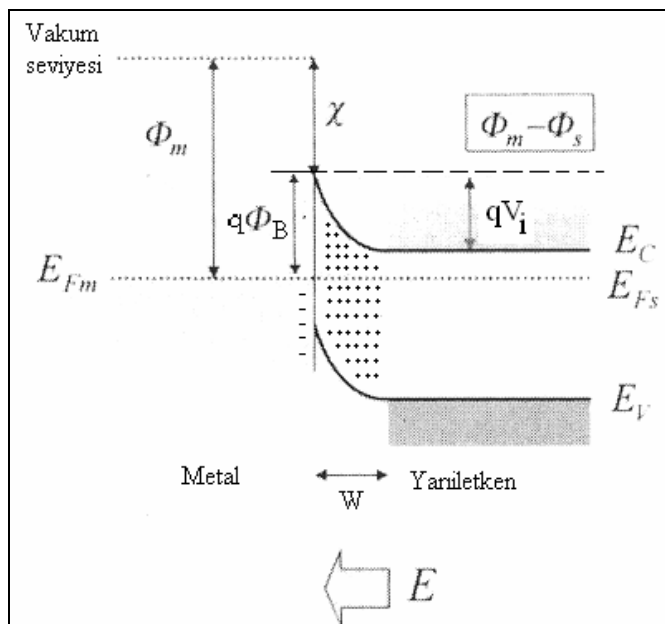
Şekil 5.1. Metal ve yarıiletkenin kontak yapılmadan önce, Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları.

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_s < \Phi_m$ olduğunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olduğunda da de ohmik kontak oluşur. (Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s 'de yarıiletkenin iş fonksiyonudur). Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için ise $\Phi_s < \Phi_m$ olması halinde ohmik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ olması halinde de doğrultucu kontak oluşur.

5.2. Schottky-Mott Teorisi

Yalıtkan ve yarıiletken kristallerin elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için malzemeye ideal kontak yapılmalıdır. İdeal kontak oluşması için malzeme yüzeylerinin yeterli derecede temiz ve pürüzsüz olması, kontak yapılacak iki maddenin birbirine minimum dirençle temas etmesi gerekir(67). Metal/n-tipi yarıiletken kontak için eğer iletkenlik bandındaki elektronlar metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiplerse ($\Phi_m > \Phi_s$), elektron akışı, Fermi seviyeleri eşit olana kadar devam eder. Elektron akışı sonucunda metale geçen elektronlar yarıiletkende pozitif yüklü safsızlık atomları bırakırlar ve böylece yarıiletkenin arayüzeye yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azalır. Fermi seviyesi E_{Fs} ile iletkenlik bant kenarı E_C ile arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile artar ve ısıtılma dengede durumunda E_{Fs} tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve valans bant kenarları

Şekil 5.2 'de gösterildiği gibi yukarıya doğru bükülür. Elektronların yarıiletkenin iletkenlik bandından metale geçmesi nedeniyle, yarıiletkenin metale yakın arayüzeyinde pozitif yüklü tüketim bölgesi oluşur(69). Bu tüketim bölgesinin (arınmış bölge) genişliği W 'dır ve bu bölgede ki pozitif yüklerin büyüklüğüne eşit miktardaki elektron yükü metal tarafında çok ince bir tabakada bulunur ve dağılım "yük tabakası" olarak adlandırılır. Bunun sonucunda yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan kurulur (pozitif yüklerden negatif yüklere doğru).



Şekil 5.2 Metal/n-tipi yarıiletken kontakta($\Phi_m > \Phi_s$) ısısal dengedeki enerji –bant diyagramı.

Metal/n-tipi yarıiletken kontakta yarıiletkenin bant aralığı, elektron ilgisi ve metalin iş fonksiyonunun değişmediği kabul edilir. Kontak yapılmasının bir sonucu olarak yarıiletkenin Fermi seviyesi (Fermi seviyelerinin dengelenmesi için yarıiletkenden metale elektron akışından dolayı) azalacaktır. Yasak enerji aralığı (E_g) kontak yapılsa da değişmediği için valans bant kenarı iletkenlik bant kenarına paralel olarak kayacaktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak sebebiyle değişmediği için yarıiletkenin vakum seviyesi de valans bant kenarı ve iletkenlik band kenarına paralel olarak kayacaktır. Böylece ısısal dengedeki metal-yarıiletken sistemin, bariyer yüksekliğini bulunması için geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması

sağlanmış olur. Metal ve yarıiletken malzemelerde tüketim bölgesinin oluşmasından ve aynı zamanda olan Fermi seviyelerinin neticesinde bantlarda bükülme meydana gelir ve bu bükülme ile potansiyel engeli oluşur. Bu modele göre V_i potansiyel engeli, metal yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşur potansiyel engeli

$$qV_i = (\phi_m - \phi_s) \quad [5.1]$$

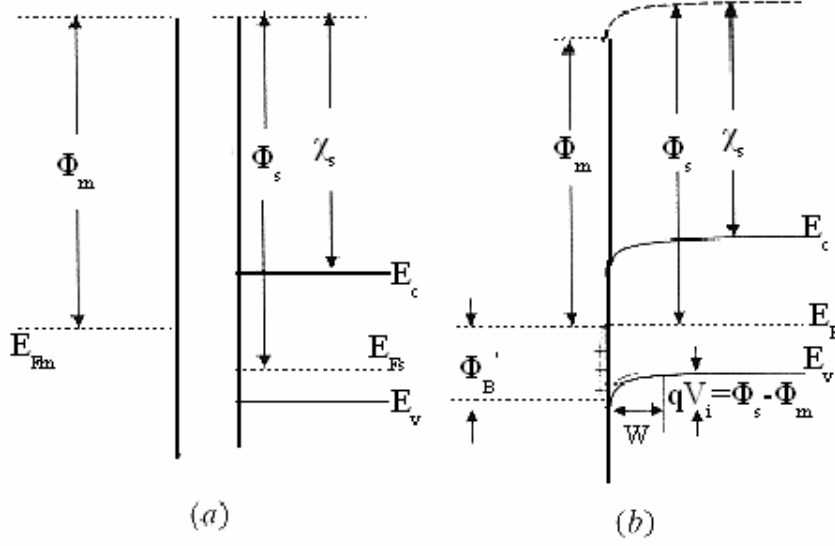
ile verilir. qV_i yarıiletkenden metale akan elektronların sahip olması gereken enerji ya da elektronların geçmesi gereken bariyer yüksekliği olarak bilinir(70).

5.2.1. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak ($\Phi_s > \Phi_m$)

Metal/p-tipi yarıiletken kontaklar metal/n-tipi yarıiletken kontaklarla benzer şekilde açıklanabilir. Fakat aralarında çok önemli bir fark bulunmaktadır: p-tipi yarıiletkenler için elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır ve akım deşikler tarafından yaratılır. Metal/p-tipi MS kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya, her iki malzemenin Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, metalden yarıiletkene bir elektron akışı olur. Yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesi ile dengelenmek için metalden yarıiletkene elektron akışından dolayı $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar yükselir. Yasak bant aralığı (E_g) kontak sebebiyle değişmediği için E_v valans bant kenarı E_c iletkenlik bant kenarına paralel olarak yukarıya doğru kayacaktır. Yarıiletkenin elektron ilgisi de kontak sebebiyle değişmediği için yarıiletkenin vakum seviyesi de E_v valans bant kenarı ve E_c iletkenlik band kenarına paralel olarak kayacaktır. Böylece Şekil 5.3(b)de gösterildiği gibi termal dengedeki metal-yarıiletken sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur

Şekil 5.3(b) gösterildiği gibi metal ve yarıiletken malzemelerin Fermi seviyelerinin aynı zamanda olmasından ve tüketim bölgesinin ortaya çıkmasından dolayı bantlarda aşağıya doğru bir bükülme meydana gelir (Yarıiletkene geçen elektronlar, metal-

yarıiletken arayüzeyinde metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırındadeşiklerle birleşirler



Şekil 5.3 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontak (Φ_s > Φ_m) enerji bant diyagramı.
 (a) Kontak oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.
 (b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu.

Elektronlarındeşiklerle birleşmesi sonucunda, yarıiletkende iyonize akseptörlerin bir uzay yük tabakası oluşur. Yarıiletkende bulunan uzay yükü tabakasındakideşik konsantrasyonu, elektron konsantrasyonuna göre oldukça az olduğu için, uzay yük bölgesi negatif yüklü iyonize akseptör atomlarının konsantrasyonuna bağlı W genişlikli bir tüketim tabakası içerir ve bir potansiyel engeli meydana gelir. Deşikler için, oluşan bu potansiyel engel yüksekliği:

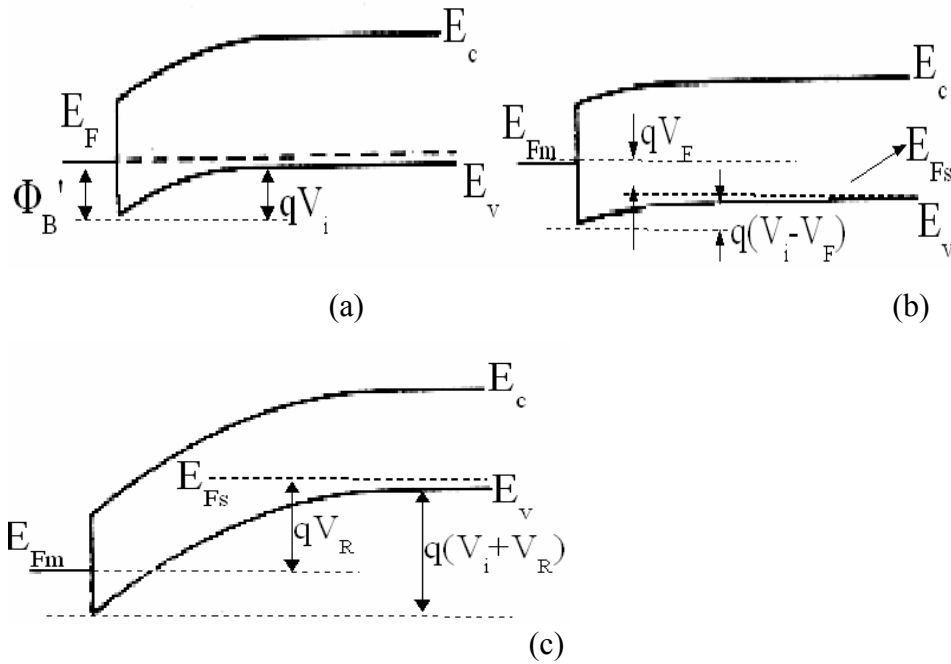
$$\phi_B = E_g + \chi_s - \phi_m \quad [5.4]$$

ile verilir. Burada E_g yarıiletkenin yasak bant aralığı, χ_s yarıiletkenin elektron ilgisi ve Φ_m ise metalin iş fonksiyonudur. Eş. [5.2], [5.3] ve [5.4] 'ten

$$\phi_B + \phi_B' = E_g \quad [5.5]$$

elde edilir. Metal/p-tipi yarıiletken kontak yapıldığında, termal denge durumunda net bir akım oluşmaz. Çünkü yarıiletkenden metale geçen elektronların yarattığı akım, metalden yarıiletkene geçen elektronların yarattığı akım ile dengelenir.

Şekil 5.4’de metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontağa bir gerilim uygulandığındaki enerji-bant diyagramı gösterilmiştir. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir ve uygulanan dış voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Uygulanan gerilim termal denge bant diyagramını değiştirir. Bu değişim, tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesiyle ve bant bükülmelerindeki değişiklik nedeniyle oluşur.



Şekil 5.4 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontakta (a) kontak yapıldıktan sonra (termal dengede), (b) doğru beslem ve (c) ters beslem enerji-bant diyagramı

Eğer kontağa bir doğru gerilim, $V=V_F$, uygulanırsa yarıiletken tarafındaki potansiyel engeli qV_i 'den $q(V_i - V_F)$ 'ye azalır (Şekil 5.4(b)). Böylece yarıiletkendeki elektronlar azalmış bir engel görecekler, sonuç olarak yarıiletkenden metale elektron akımı termal denge değerine göre artacaktır. Metalde herhangi bir gerilim düşmesi olmadığı için, metalden yarıiletkene elektron akımı termal denge değerine göre değişmez.

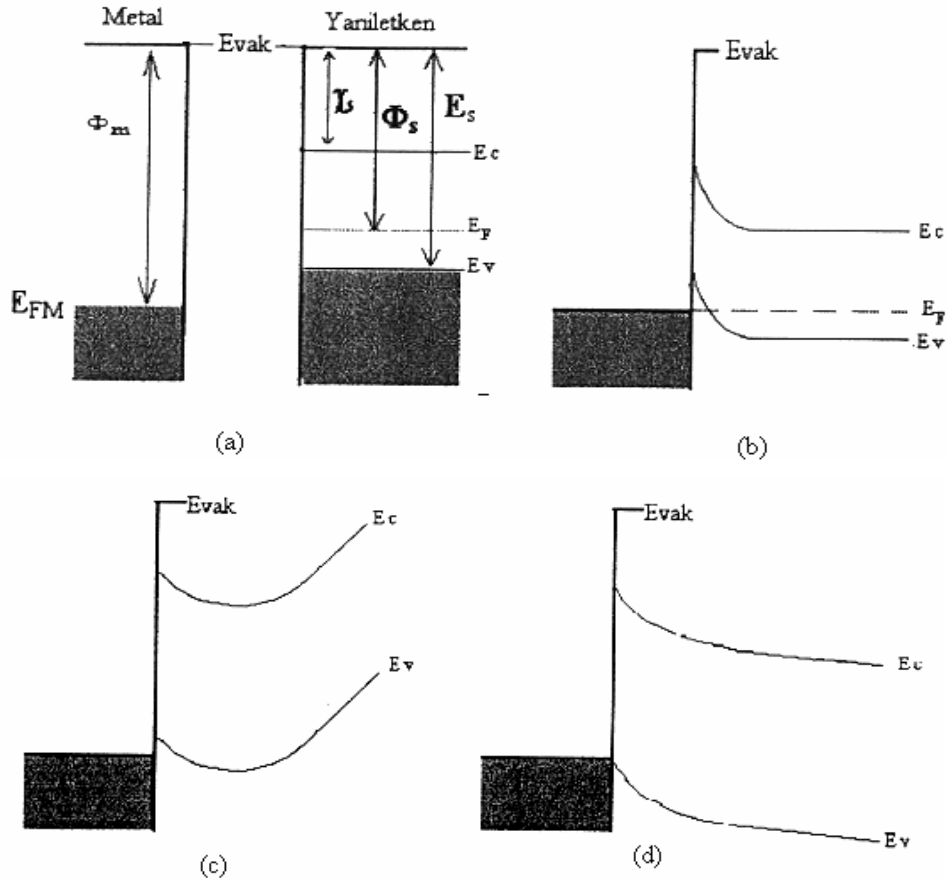
Sonuç olarak yarıiletkeniden metale doğru olan net bir elektron akımı gözlemlenir. Doğru beslem akımı, uygulanan V_F voltajı ile üstel olarak artar.

Eğer kontağa ters bir gerilim, $V=-V_R$, tüketim bölgesindeki potansiyel engeli qV_i 'den $q(V_i+V_R)$ 'ye artar (Şekil 5.4(c)). Böylece yarıiletkeniden metale doğru olan elektron akımı termal denge durumuna göre azalırken, metalden yarıiletkene doğru olan elektron akımı değişmez kalır. Yarıiletkeniden metale doğru elektron akışı termal denge durumuna göre azalır(67).

5.2.2. Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontak ($\Phi_s < \Phi_m$)

Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse yarıiletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar yukarıdadır. Yarıiletkenin iletkenlik bandında bulunan elektronlar, yarıiletkende pozitif yükler bırakarak termal denge kuruluncaya kadar metale doğru akarlar. Bu elektron akışından dolayı, yarıiletkenin Fermi seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar aşağıya düşer.

Yarıiletkenden metale akan elektronlar sebebiyle, metalin yarıiletken kenarında negatif yükler, yarıiletkende de azalan elektron konsantrasyonundan yani artan deşik konsantrasyonundan dolayı yarıiletkenin metal kenarında pozitif yükler oluşur. Metaldeki elektronlar, yarıiletkenin içindeki izinli durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi deşiklerin, yarıiletkenden metale doğru akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen deşikler nötralize olurlar. Şekil 5.5 (a) ve (b)'de kontak oluşmadan önce ve oluşuktan sonra metal/p-tipi ohmik kontak için enerji-bant diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontak için (a) kontak oluşmadan önce (b) kontak oluşuktan sonra termal denge, (c) doğru beslem ve (d) ters beslem altında enerji bant diyagramı

Ters beslem altında, metalin iletkenlik bandından termal olarak oluşandeşikler kolayca yarıiletken tarafına geçebilirler. Böylece hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkeniden metale doğru akım kolayca geçebildiğinden bu tür kontaklar, ohmik kontaklar olarak bilinir. Şekil 5.5(c)'de doğru ve ters beslem uygulandığında metal/p-tipi yarıiletken ohmik kontak için enerji bant diyagramı gösterilmiştir.

5.2.3. Yüzey durumları ve yalıtkan bir arayüzey tabakasına sahip olan kontaklar

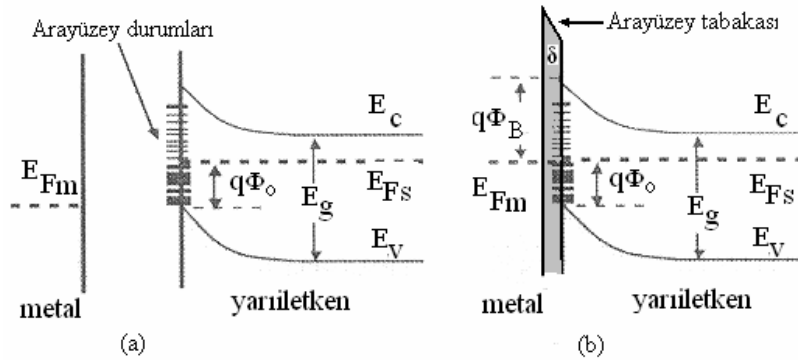
Bir çok metal-yarıiletken kontakta, yüzeye metal çöktürülmeden önce, yarıiletken yüzeyi kimyasal olarak temizlenir. Kontak yapılacak yüzeyin yeterli derecede temiz

olmamasından dolayı yarıiletken yüzeyinde ince bir tabaka oluşur yada isteğe bağlı olarak yüzeyde ince bir oksit tabakası bırakılır. Bu tabakanın kalınlığı δ , yüzey temizleme metotlarına bağlı olarak iyi bir Schottky kontakta 20 Å'dan daha az olmalıdır.

Yarıiletkenin gövde yapısındaki safsızlıklardan yada kusurlardan dolayı arayüzeyde, kristalin periyodik doğasında bozulmalar olur ve arayüzey yakınında, yarıiletkenin bant aralığında bulunan izinli seviyelerinde oldukça fazla sayıda bir artış meydana gelir. Bu seviyelere “arayüzey durumları” yada “arayüzey tuzakları” denir. Enerji değerleri E_v 'den E_c 'ye değişir ve eğer Fermi seviyesinin altındalarsa, elektronlar tarafından doldurulur(69).

Arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakasına sahip olan kontaklar genellikle yarıiletken aygıtlarda görülür ve yüzey durumları ve arayüzey tabakasına sahip metal-yarıiletken kontakların genel analizi ilk olarak Cowley ve Sze tarafından yapılmıştır(71). Bu kontakların detaylı bir şekilde açıklaması ise Northrop ve Rhoderick tarafından verilmiştir. Arayüzey durumlarına ve oksit arayüzey tabakasına sahip bir kontağın enerji bant diyagramı Şekil 5.6'de gösterilmiştir(72,73).

Fermi seviyesi sistem boyunca aynı hizadadır ve vakum seviyesi arayüzeyde süreklidir. Şekil 5.6 (b)'de kontak yapıldıktan sonra arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakasına sahip metal-yarıiletken kontağın enerji-bant diyagramı gösterilmiştir. Arayüzey oksit tabakasında potansiyel lineer olarak düşer, çünkü bu tabaka yüklerin bulunmadığı yalıtkan bir tabaka olarak kabul edilir. Yalıtkanın iletkenlik bandı alt sınırının vakum seviyesinin altında olduğu kabul edilir. Arayüzey tabakası yeterince ince olursa ($\delta < 20\text{Å}$), tabaka boyunca potansiyel düşmesi, yarıiletkenin tüketim tabakasına göre ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böyle ince bir tabaka elektronların tünelleme yapmasına da izin verir. Bu sebeplerden dolayı Φ_B engel yüksekliği ve V_i kontak potansiyel farkı, ince bir arayüzey tabakasının varlığından etkilenmez

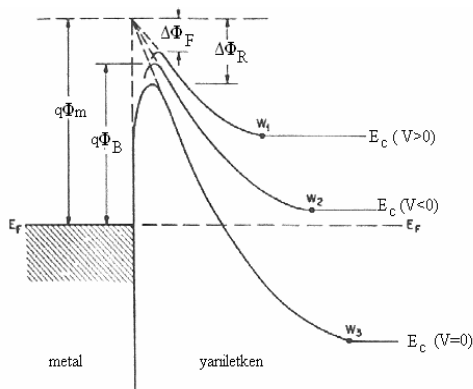


Şekil 5.6 Arayüzey durumlarına ve arayüzey tabakasına sahip metal-yarıiletken kontakta (a) kontak yapılmadan önce, ve (b) kontak yapıldıktan sonra enerji-bant diyagramı

Sonuç olarak, eğer arayüzey tabakası yeterli incelikte değilse yada yarıiletkende arayüzey durumları varsa, engel yüksekliği ideal Schottky diyotununkinden daha küçük değerlere sahip olur ve bu arayüzey tabakası nedeniyle elektronlar engelden tünelleme yoluyla geçerler. Engel yüksekliğinin bu şekildeki gerilim bağımlılığı akım –gerilim karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına neden olur ve ideallikten sapmalar idealite faktörü n , ile ifade edilir(74).

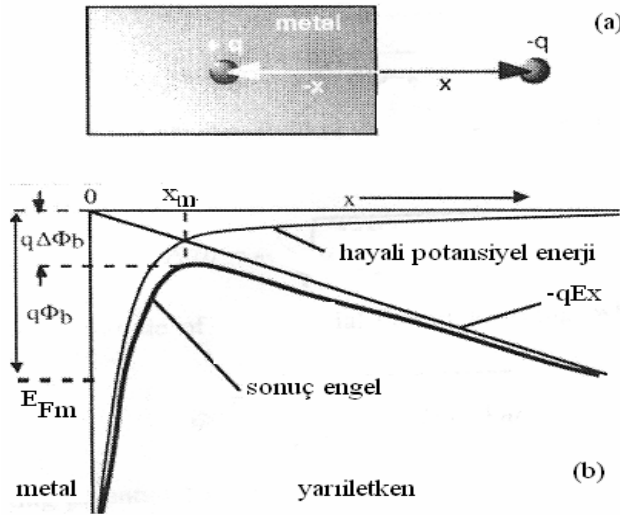
5.3. Schottky Etkisi (hayali kuvvet engel alçalması)

Metal tarafındaki potansiyel engeli Φ_B sabit değildir ve uygulanan gerilimle değişir. Φ_B 'de bir alçalma gözlemlenir (Şekil 5.7). Bu alçalma, yarıiletkendeki elektronlar nedeniyle metalde yaratılan görüntü yükler nedeniyledir ve ilk defa Schottky tarafından çalışıldığı için bu olaya “Schottky Etkisi” denilir.



Şekil 5.7 Dış bir gerilim altında metal/n-tipi yarıiletken için Schottky engel alçalmasındaki değişim

Elektrostatığe göre, metalden x uzaklığında bir yük $(-q)$ olduğunda, iletkenin içinde aynı büyüklükteki zıt yüke $(+q)$ sahip olan ve iletkenin yüzeyinden x uzaklığı kadar derinlikte bulunan bir görüntü yükü yaratılır (Şekil 5.7 (a)). Sonuç olarak, yük metal tarafından çekilir ve metal-yarıiletken kontak durumunda, potansiyel engeli alçalır (Şekil 5.8(b)) (5,69).



Şekil 5.8 (a) Elektron ile metaldeki görüntü yükün şematik diyagramı ve (b) dış bir alan yokken potansiyel engel alçalması

Şekil 5.8 'de görüldüğü gibi toplam potansiyel, Coulomb potansiyeli ve elektriksel potansiyelin toplamı olup ;

$$U_T(x) = -\frac{q^2}{16\pi\epsilon_d x} - qEx \quad [5.6]$$

eşitliği ile verilir. Bu ifadenin konuma göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse, $dU_T(x)/dx=0$, potansiyelin maksimumuna karşılık gelen x_m ifadesi ;

$$x = x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_d E}} \quad [5.7]$$

olur. X_m alçalmanın olduğu yerdir. Gerekli düzenlemeler yapılırsa potansiyel engel alçalması:

$$\Delta\phi_B = \sqrt[4]{\frac{q^3 N_D (V_i - V)}{8\pi^2 \epsilon_d^3}} \quad [5.8]$$

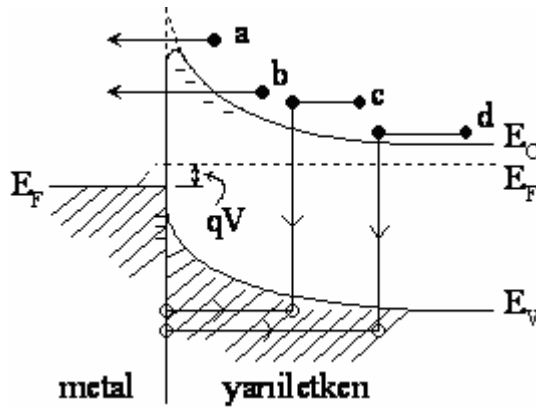
olur Burada N_D yarıiletkendeki donör konsantrasyonu, ϵ_d hayali kuvvetlerin dielektrik sabiti, V_i kontak potansiyel farkı ve V ise uygulanan gerilimdir(75).

5.4. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım -İletim Mekanizmaları

Metal-yarıiletken kontaklarda, seri direnç (R_s), arayüzeydeki oksit tabaka kalınlığı (δ), sıcaklık, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), beslem gerilimi türü ve yarıiletkenin tipi gibi parametreler Schottky diyotlardaki akım iletim mekanizmalarını etkilemektedir. Bu parametrelerin etkisinde, hangi durumda hangi iletim mekanizmasının en doğru sonucu vereceğini belirlemek oldukça önemlidir. MS kontaklarda akım iletimi, azınlık taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin aksine, çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır.

Doğru beslem altında MS kontaklarda kullanılan temel akım-iletim mekanizmaları şunlardır(5,70,73) (Şekil 5.9):

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE))
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu
- To etkili akım iletimi



Şekil 5.9 Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c)Uzay yük bölgesinde birleşme, (d)doğal bölgede deşik enjeksiyonu

5.4.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE)

Termiyonik Emisyon, Schottky kontaklarda yeterli termal enerjiyi kazanan taşıyıcıların potansiyel engel üzerinden yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmeleri olayı olarak bilinir. Bu olay metal/n-tipi yarıiletken yapılarda elektronlarla, metal/p-tipi yarıiletken yapılarda deşikler tarafından sağlanır Metal tarafı uygulanan voltajdan bağımsızdır. Bundan dolayı termal enerjileri nedeniyle metal tarafındaki engeli aşan elektronların oluşturduğu bu akım yoğunluğu J_0 termiyonik akım yoğunluğudur. Beethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu Termiyonik Emisyon Teorisinin varsayımları şunlardır

- Potansiyel engelinin yüksekliği, kT/q enerjisinden çok büyüktür .
- Termal denge emisyonun olduğu düzlemde kurulur.
- Net bir akımın varlığı bu dengeyi etkilemez ve böylece, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene geçen akım yoğunlukları toplanabilir.
- Görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte,engelin biçimi önemsiz olup akım engel yüksekliğine zayıfça bağlıdır(5,73).

Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu J_{sm} ifadesi, TE teorisine göre şöyle verilir

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) \quad [5.9]$$

Burada, Φ_B sıfır beslem engel yüksekliği, $V_D=V-IR_s$ diyot üzerine düşen gerilim, V uygulanan gerilim ve A^* ise etkin Richardson sabitidir ve $A^*=4qm^*k^2/h^3$ ile verilir.

Elektronlar için engel yüksekliği metalden yarıiletkene giderken aynı kalır, böylece yarıiletkene giden akım, uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu nedenle denge durumunda ($V=0$), metalden yarıiletkene geçen akım, yarıiletkenden metale geçen akıma eşit olmalıdır. O halde metalden yarıiletkene geçen akım yoğunluğu Eş.[5.9]'daki ifadede $V=0$ değeri yerine konularak,

$$J_{ms} = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad [5.10]$$

ile verilir. Toplam akım J_n , Eş.[5.9] ve [5.10]'un toplamı olup,

$$J_n = \left[A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad [5.11]$$

eşitliği ile verilir. Burada ilk terim, J_0 ters doyum akım yoğunluğudur(5).

5.5. Schottky Diyodlarında Doğru Beslem I-V Karakteristikleri

TE teorisine göre Schottky diyodlarında doğru beslem altındaki akım yoğunluğu-gerilim ilişkisinin, Eş.[5.11]'de verilmiştir. Akım yoğunluğu $J=I/A$ 'dır. Pratikte Schottky diyodlarında, doğru beslem akım-gerilim karakteristikleri ideal durumdan bazı sapmalar olabilir. Yani boyutsuz olan idealite faktörü (n) birden büyük ve seri

direnç sıfırdan büyük olabilir. Bu durumda Eş.[5.11]'deki akım ifadesi, $\exp(qV_D/nkT) \gg 1$ durumu da göz önüne alınırsa

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{q\phi_{B_0}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right] \quad [5.12]$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Buna ilaveten son zamanlarda yüksek seri direnç ve idealite faktörüne sahip Schottky kontaklarında; seri direnç (R_s), idealite faktörü (n) ve sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{B_0}) gibi temel diyot parametrelerini tayin etmek amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir H.Norde tarafından geliştirilen ve Cheung tarafından modifiye edilen iki fonksiyon aşağıdaki gibidir(76-79).

$$\frac{dV}{d(LnI)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad [5.23]$$

$$H(I) = n\phi_{B_0} + IR_s \quad [5.25]$$

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının Moleküler Demet Epitaksi yöntemiyle büyütülmesini, büyütülmüş bu malzemenin kimyasal olarak temizlenmesini ve ardından karakterize edilmesini inceleyeceğiz.

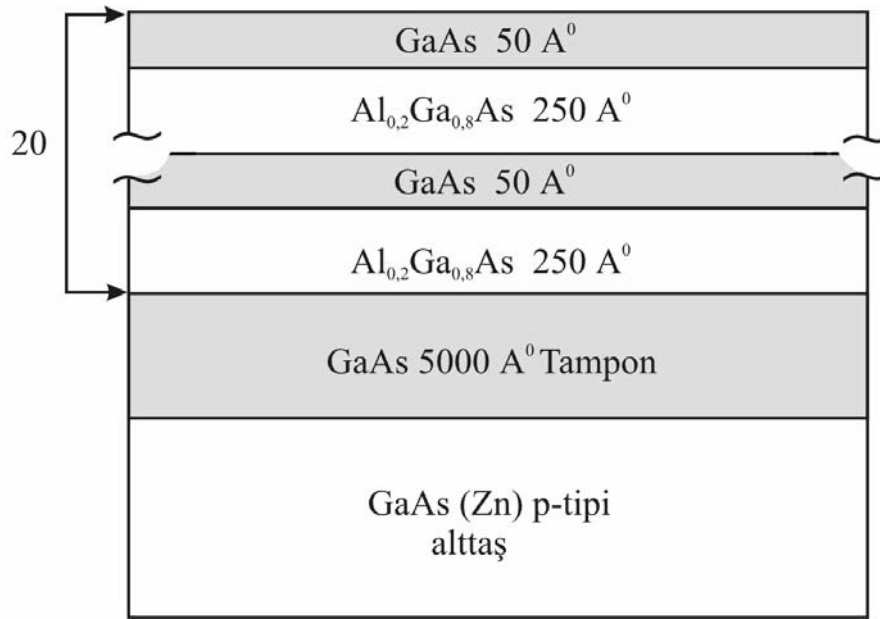
6.1. Moleküler Demet Epitaksi Metodu ile $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ Yapısının Büyütülmesi

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısı Gazi Üniversitesi Yarıiletken İleri Araştırma Laboratuvarında (STARLAB) bulunan SEMICON V80H-10 MBE sisteminde büyütülmüştür. Malzemenin büyütülme işlemine başlanmadan önce MBE sistemi (200-250°C) sıcaklıkta vakum altında efüzyon hücreleri yokken, hücreler boş olarak takıldıktan sonra ve hücrelerin içine malzemeler konulduktan sonra fırınladı (bake) ve her bir durum için gaz temizliği yapıldı. Sistem vakum kaçağı kontrolünün ardından büyütme işlemine hazırdır.

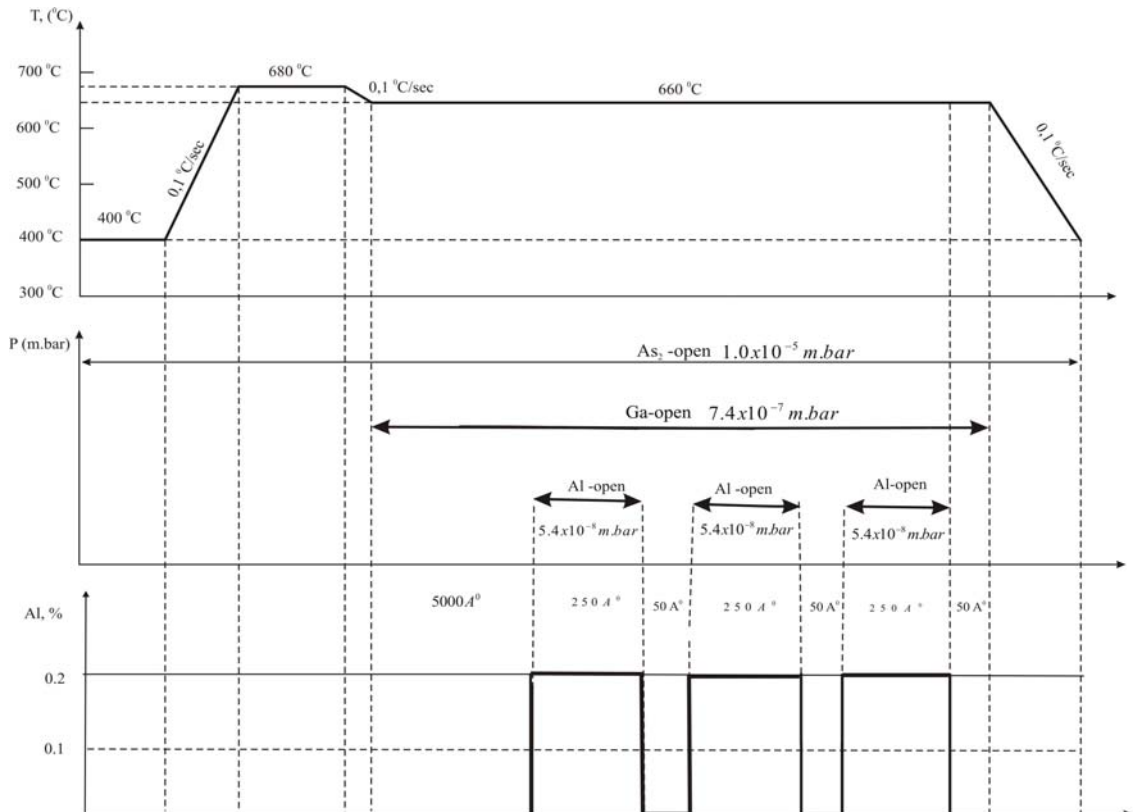
İlk olarak Zn ile katkılanmış (100) GaAs alttaşı, temizlenmiş Mo alttaş tutucuya yerleştirildi. Alttaş tutucu kaset mekanizmasına yerleştirildi. Alttaş, kaset mekanizmasıyla birlikte azotla temizlenmiş (sistemin atmosfere açılması gerektiğinde, vakum kırıldığında sisteme girebilecek gazların burada reaksiyona girmemesi için sisteme turbo moleküler pompa kullanılarak azot gazı verilir) ve atmosfer basıncındaki FEL'e temiz eldivenlerle yerleştirildi. FEL kapısı ve contası temizlendikten sonra kapak kapatıldı. Turbo moleküler pompa ile FEL vakumlanmaya başlandı. Basınç düştükten sonra (10^{-9} mbar mertebesinde) FEL'in hazırlama odasına açılan vanası açıldı ve alttaş hazırlama odasına alındı. Bu odada alttaş yaklaşık 400 °C'ye ısıtılarak yüzeyinin gazlardan temizlenmesi sağlandı (gaz atma işlemi). Bu bölge daha düşük basınçlar için iyon pompası ile vakumlandı. Gaz atma işlemi tamamlanan alttaş, büyütme odasına alındı ve manipülatöre takıldı. Oda kapatıldı ve pompalandı. Bu odada da gaz atma işlemin yapıldıktan sonra alttaş büyütmeğe hazırdır.

Alttaşın sıcaklığı gaz atma işlemi için yeterli olan 400 °C'ye ulaştıktan sonra As kaynağı açıldı (büyütme bitene kadar açık kalır). Büyütme işlemi sırasında bulk halindeki As sıcaklığı 350 °C ve parçalama sıcaklığı ise 950 °C'dir. Böylece elde edilen As₂'nin akı değeri 1×10^{-5} mbar'a ayarlandı. Büyütme işleminde öncelikle Zn ile katkılanmış (100) yönelimli GaAs alttaş, sıcaklık 0.1 °C/s 'lik adımlarla artırılarak 400 °C'ye ısıtıldı. Daha sonra, alttaş üzerinde oluşan oksit tabakasının kaldırılması için, alttaş sıcaklığı 0.1 °C/s 'lik adımlarla artırılarak 680 °C'ye çıkarıldı. RHEED ile oksit tabakasının kalktığı gözlemlendi. Bu işlemten sonra, alttaş sıcaklığı büyütmeye sıcaklığı olan 660 °C'ye indirildi (Şekil 6.2).

Alttaş büyütmeye sıcaklığına ulaştıktan sonra büyütmeye işlemine başlandı. Alttaş sıcaklığı 660 °C'ye indiğinde açık olan As hücreesine ek olarak Ga hücresi de açılarak 5000 Å⁰ kalınlığında katkılanmamış GaAs tampon tabakası 2.78 Å⁰ /s'lik büyüme hızıyla büyütüldü. Ga hücresinin sıcaklığı 931 °C ve sağladığı akı 7.6×10^{-7} mbar'dır. 5000 Å⁰ kalınlığındaki GaAs tampon tabakası büyütüldükten sonra Al hücresi açılarak 250 Å⁰ kalınlığında katkılanmamış Al_{0.2}Ga_{0.8}As tabakası AlAs için 0.168 Å⁰ /s'lik ve GaAs için 0.67 Å⁰ /s'lik büyüme hızıyla büyütüldü. Al kaynağının sıcaklığı 1065 °C ve sağladığı akı 5.17×10^{-8} mbar'dır. Al_{0.2}Ga_{0.8}As tabakasının büyütülmesinden sonra Al kaynağı kapatıldı. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi 250 Å⁰ kalınlıklı Al_{0.2}Ga_{0.8}As ve ardından 50 Å⁰ kalınlıklı GaAs tabaka 20 periyotlu olarak büyütüldü. Son olarak, alttaş sıcaklığı 0.1 °C/s adımla 250 °C'ye indirildi ve As kaynağı kapatıldı.



Şekil 6.1 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SL diyot yapısı



Şekil 6.2 Büyütme işlemi sırasındaki Ga, Al, As, Si akıları ve Al konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimi

6.2. Büyütülen $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SL Yapısının Islak Aşındırması

Bu çalışmada, büyütülen malzemeye yapılacak olan ohmik ve doğrultucu (Schottky diyet) kontakların yüksek performanslı ve deneysel ölçüm sonuçlarının güvenilir olması için, kontakların yapılacağı yüzeylerin, organik kirlerden, oksit tabakasından ve mekanik pürüzlerden arınmış olması gerekir. Bu koşulların sağlanabilmesi için $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısına ıslak kimyasal aşındırma (temizleme) işlemi uygulanmıştır. Aşındırmanın amacı; desen oluşturulması (maske (resist) kullanılır), cilalama ve kusurların veya malzeme yüzeyindeki zararların yok edilmesidir. Aşındırma ıslak (izotropik, kimyasal) aşındırma ve kuru (anizotropik) aşındırma olarak ikiye ayrılır. İzotropik aşındırmada her yönde ve aynı hızda aşındırma olur. Anizotropik aşındırmada ise aşındırma yöne bağlıdır (her bir doğrultudaki aşındırma hızı farklıdır) ve aşındırılmış kenarlar neredeyse diktir.

Islak aşındırma en kolay aşındırma metodudur. Malzeme, kimyasal solüsyon kullanılarak aşındırılır ve malzeme için uygun olan kimyasal solüsyonun seçiminde dört önemli nokta vardır. Bunlar: aşındırma hızı, profil (anizotropi ve morfoloji), seçicilik ve malzemeye verilen zarardır. Aşındırma hızı kristalin yapısal özelliklerine (morfoloji, yönelim, mükemmeliği vb.), sıcaklığa, solüsyonun içeriğine ve aşındırma zamanına bağlıdır.

Kimyasal solüsyonun içeriğinde bulunan asitlerin bir kısmı yüzeyde bulunan kopuk bağları oksitleştirir, diğer kısmı ise yüzeyde meydana gelen oksit tabakasını götürür. Bu olay, kimyasal aşındırmanın ana mekanizmasıdır. Farklı malzemelerin kimyasal aşındırma işlemi için kullanılan solüsyonlar, malzeme özelliklerine göre farklılık gösterir. Solüsyon seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar: malzemeye zarar vermeden, arzu edilen sıcaklıkta malzemeyle tepkimeye girerek istenilen hızda aşındırma yapacak solüsyonun seçilmesidir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1 GaAs ve AlGaAs ıslak aşındırması için kullanılan kimyasal solüsyonlar.

Solüsyon (Etchant)	Aşındırma hızı ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Açıklama
$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + 3\text{CH}_3\text{OH}$	2	GaAs
$\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.5-5	GaAs
$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	0.04	GaAs
$\text{HCl} + 4\text{H}_2\text{O}_2 + 40\text{H}_2\text{O}$	0.22	GaAs
$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}_2$	Al kompozisyonuna bağlı	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
$\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$ NH_4OH pH ayarlıyor ($1 < \text{pH} < 6$)	Al kompozisyonuna bağlı	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x \geq 0.1$

Büyüttüğümüz $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısı, ohmik ve Schottky kontakların yapılmasından önce yüzeyin temizlenmesi amacıyla ıslak kimyasal aşındırma işlemine tabi tutuldu. Yarıiletken kristale uygulanan kimyasal aşındırma işleminin aşamaları şöyledir:

- 1) Yarıiletken kristalimizin kimyasal aşındırma işlemi için $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$ maddeleri kullanılarak (1:1:300) oranlarında kimyasal solüsyon hazırlandı.
- 2) Hazırlanan solüsyonda kristalimizi 5 saniye çalkalayarak yüzeyden yaklaşık olarak 3×10^{-3} mikron ($=30 \text{ \AA}$) kalınlığında bir tabakanın aşındırılmasını sağladık.
- 3) Solüsyonla çalkalama işlemi bittikten sonra kristalimizi yüzeyinde herhangi bir kimyasal solüsyon artığının kalmaması için, kristalimizi deiyonize su kullanarak birkaç kez yıkadık.
- 4) Kristalimizi iyicene duruladıktan sonra, filtre kağıdı kullanarak kuruladık. Böylece malzememiz metal kontakların yapılması için uygun hale geldi

Ohmik ve Schottky kontak yapımında kullanılan %99.999 saflıktaki Au metalide, hiç bir organik kirlilik içermemesi için kontak yapımından önce, sırasıyla 10 dakika süreyle metanolde ve yine 10 dakika süreyle deiyonize suda ultrasonik olarak yıkandıktan sonra filtre kağıdı ile kurulandı.

6.3. Metal-Yarıiletken (MS) Ohmik ve Doğrultucu Kontakların Oluşturulması

6.3.1. Ohmik kontağın oluşturulması

Kimyasal olarak temizlenmiş malzememizin alttaş tarafına ohmik kontak ve film büyütülmüş tarafına da doğrultucu kontağın oluşturulmasında vakumda buharlaştırma sistemi kullanıldı. Ohmik kontağın oluşturulması için, kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin alttaş tarafı, aşağı gelecek şekilde malzeme tutucusunda bulunan dikdörtgen geometriye sahip bakır bir maske üzerine yerleştirildi. Ohmik ve doğrultucu kontakların yapımı için Şekil 6.3'te gösterilen maskeler kullanıldı. Buharlaştırma işlemine safsızlıkların karışmasını engellemek amacıyla, Maske de Au meteline uygulanan temizleme işlemine tabi tutuldu. Şekil 6.3(a)'dan görüldüğü gibi maske yardımıyla elde edilen ohmik kontak dikdörtgen geometriye sahip olacaktır.



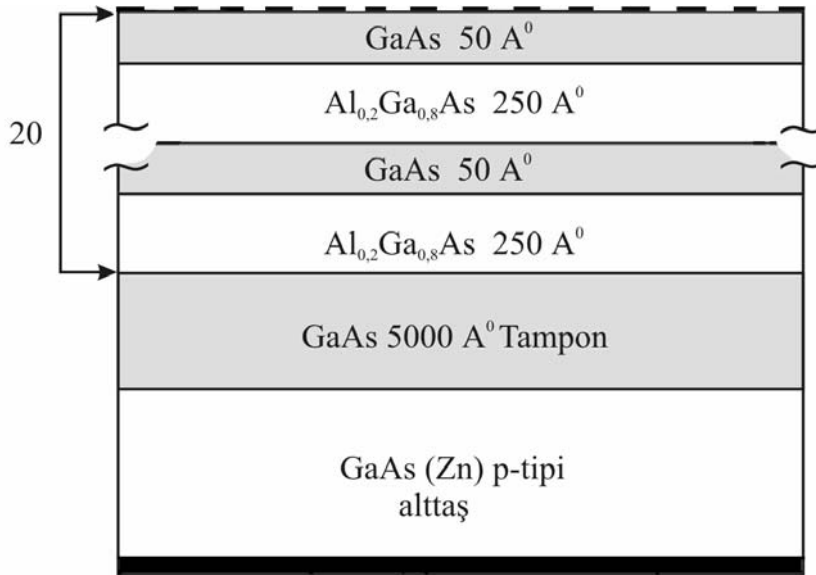
Şekil 6.3 Kontaklar için kullanılan maskeler: (a) Ohmik, (b) Doğrultucu kontak

Vakumda buharlaştırma sistemiyle (10^{-6} Torr) kimyasal olarak temizlenmiş altın parçacıklarının yarıiletken malzeme üzerine buharlaşması sağlandı. Son olarak üzerine altın buharlaştırılmış olan yarıiletken malzeme vakumlu fırına yerleştirilerek, 400 °C'de 90 dakika boyunca tavlandı. Böylece ohmik kontak yapılma işlemi tamamlanmış oldu.

6.3.2. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Doğrultucu kontakların yapımı için Şekil 6.3 (b)'de gösterilen maske kullanıldı. Maske ohmik kontak yapılma işlemine olduğu gibi, buharlaştırma işlemine ve safsızlıkların karışmasını engellemek amacıyla, kimyasal temizleme işlemine tabi

tutuldu. Buharlaştırma işlemi sonucunda 2500 Å kalınlıklı, 0.011 cm² alanlı nokta doğrultucu kontaklar elde edildi. Ohmik ve doğrultucu kontaklar oluşturulduktan sonra Au/ Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısı Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Ohmik ve doğrultucu kontaklar oluşturulduktan sonra Au/ Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısının şematik diyagramı; malzemenin üst kısmı doğrultucu kantağı alt kısmı ise ohmik kantağı göstermektedir

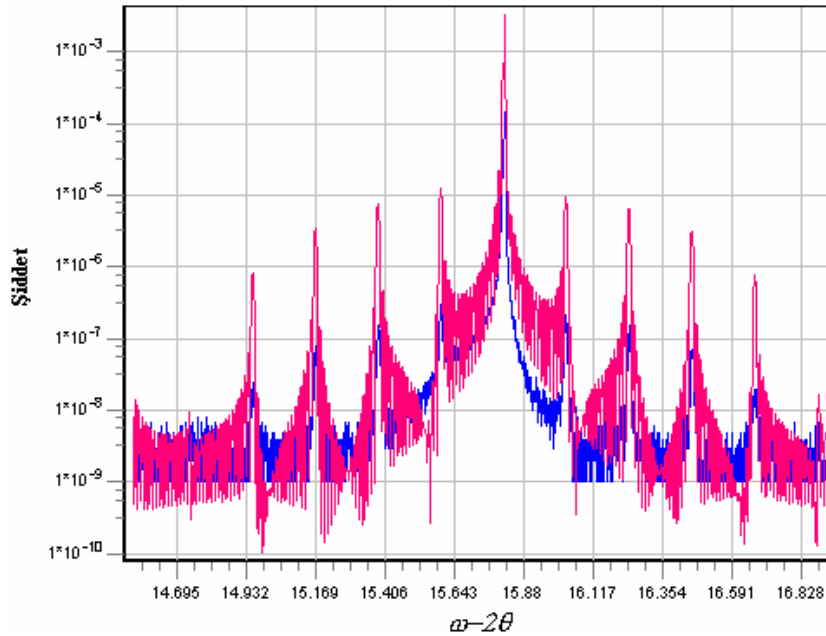
6.4. Ölçme Ve Değerlendirme İşlemleri

6.4.1. X-ışınları karakterizasyonu

MBE tekniği ile büyütülen Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs SL yapısının yapısal analizini, STARLAB’da bulunan 4 kristalli monokromatör içeren Bruker-AXS D8- Discovery yüksek çözünürlüklü X – ışını kırınımı (HR – XRD) cihazı ile yapılmıştır. Tekli epitaksiyel tabakalardan ve alttaştan, X-ışını kırınımının kullanılması, MBE çalışmalarında, özellikle tabakaların örgü uyumunu sağlamak için gerekli olan kompozisyon kontrolünün doğrulukla yapılabilmesi ve tabaka kalınlığının elde edilmesi için oldukça yararlıdır.

Cihazın özellikleri şöyledir: Cihaz 4- kristalli Ge (022) simetrik monokromatör içerir. Her bir Ge kristali (220) düzlemine paralel olan kanal içermektedir. Bu

geometri oldukça paralel ve monokromatik X-ışını demeti sağlar. (Si 002 için azami FWHM genişliği 0.0035°). X-ışını kaynağı Philips marka X-ışını $\text{CuK}\alpha(1.43\text{\AA})$ tüpüdür. X-ışını detektörü NaI detektördür ve detektör sliti 1mm'dir. Veriler bu dedektör sayesinde bilgisayar ortamına aktarılır. Voltaj değeri 60kV (40mA) ve gücü 2.2Watt mertebesindedir. Kapalı devre 5lt/dk su akısı ile soğutulur. Çoklu epitaksiyel tabakaların X-ışını kırınım metodu ile incelenmesi, MBE tabanlı örneklerde tabaka kalınlıklarının ve örgü yapısının anlaşılmasında gerekli kimyasal bileşenlerin belirlenmesinde oldukça yararlıdır. Tabaka kalınlıkları genelde rocking eğrisinin piklerinden belirlenirken örneğin kimyasal bileşenleri eğrinin geniş veya dar açıda yerleşmesinden anlaşılır. X-ışını cihazında ölçülen rocking eğrileri LEPTOS programı ile simule edildi. Bu program hem kinematik hem de dinamik metotları kullanır ve kalınlık ölçümleri nanometre duyarlıktadır. Ayrıca X-ışınları metodu diğer karakterize metotlarına (TEM, HALL, AFM) göre örneğe herhangi bir zarar vermez. Elde edilen veriler Şekil 6.5'da ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.5 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ MQW diyot için $\text{GaAs}(002)$ yansıması civarındaki Rocking eğrisi: mavi renk tarama değerleri (deneysel) ve kırmızı renk ise simülasyonu(teorik)gösterir

Şekil 6.5'da verilen Rocking eğrisinin yatay eksenini hem numunenin ve hem de dedektörün birlikte hareket etmesi sonucu $\text{GaAs}(002)$ yansımaları açılarını

gösterir. Düşey eksen şiddetin bağıl değerini gösterir. Şekilde görüldüğü en yüksek pik alttaşa ait yansıma ve hemen solunda yer alan pik ise tampon tabakaya aittir. Bu iki pike ek olarak, eşit aralıklı yansımalar girişim saçaklarıdır (fringes). Bu saçakların oluşma nedeni, çoklu girişimlerin meydana gelmesidir. X-ışınları malzemeden çıkmadan önce, farklı atomik düzlemlerden tekrar tekrar kırınıma uğrar (61). Bu girişim saçakları yalnızca oldukça düzgün kalınlığa sahip ince tabakalarda ve düz, iyi hazırlanmış alttaş yüzeyinde görülür.

Çizelge 6.2 MBE ile büyütülen $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının X-Işını karakterizasyonu sonucunda, ara yüzeylerin normal ve ölçülen kütle yoğunlukları, tabaka kalınlıkları ve Al bileşik yüzdesi verileri

Tabaka	Malzeme	Kalınlık (nm) ± 0.01	%X
1	GaAs	4,1926	0,00
2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	17,0265	20,08
3	GaAs	472,6631	0,00
Alttaş	GaAs	0,0000	0,00

Çizelge 6.2’de verilen kalınlık ve konsantrasyon değerlerinden görüldüğü üzere, X-ışınları karakterizasyonu sonucunda elde edilen ara yüzeylerin normal ve ölçülen kütle yoğunlukları, Al konsantrasyonu (%X) ve tabaka kalınlıkları değerleri, yapı büyütülürken göz önünde bulundurulanan değerlerle uyumluluk gösterir.

6.4.2. I-V ölçümleri

Doğru beslem (I-V-T) karakteristikleri

Seri dirence sahip Schottky engel diyotlar ve benzeri yapılarda, doğru beslem gerilimi V ile akım I ilişkisi, termiyonik emisyon teorisine göre şu şekilde verilir (23,62):

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right)\right] \quad [6.1]$$

Burada V doğru beslem gerilimi, n yapının idealite faktörü, R_s seri direnç, I₀ ise ters doyum akımıdır. Bu denklemde I₀, LnI-V grafiğinde eğrinin lineer bölgesinin sıfır gerilim değerinde akım eksenine fit edilmesi ile elde edilir ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad [6.2]$$

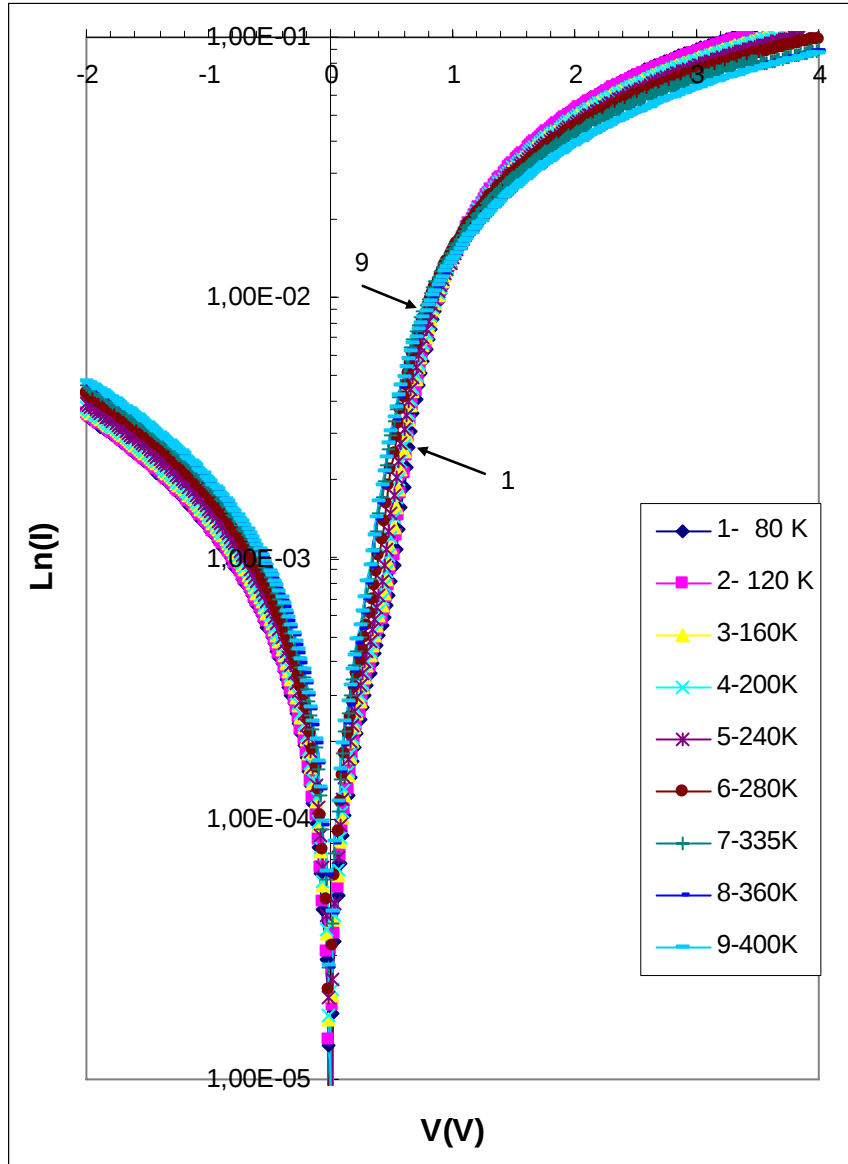
eşitliği ile verilir. Burada A diyot alanı (cm²) ve A* ise efektif Richarson sabitidir ve değeri p-GaAs için 3 A/cm²K²'dir. Φ_{B0}, sıfır beslem engel yüksekliğidir (eV). Eş.[6.1] kullanılarak, diyot için idealite faktörü şu şekilde yazılabilir:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{dLn(I)} \right) \quad [6.3]$$

Burada dV/d(LnI) terimi, yarı-logaritmik lnI-V grafiğinin lineer bölgesinin eğimidir. Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısına ait 80 K-400 K sıcaklık aralığındaki doğru beslem yarı-logaritmik Ln I-V karakteristiği Şekil 6.6'de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi akım ile gerilim arasında üstel bir ilişki vardır ve her bir eğri orta gerilim bölgesinde farklı eğimlere sahip lineer iki bölgeye sahiptir. Bu yüzden denklem 6.1'deki ifade

$$I = I_{01} \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right] + I_{02} \exp\left[\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right] \quad [6.4]$$

şekline dönüşür. Şekil 6.6'de verilen doğru beslem Ln I-V grafiğinde her iki lineer bölge için n, I₀ ve Φ_B değerleri hesaplandı ve çizelge 6.3'de verildi. Ancak bir Schottky diyodu için orta gerilim bölgesi olan 2. bölge daha güvenilir sonuçlar verir.



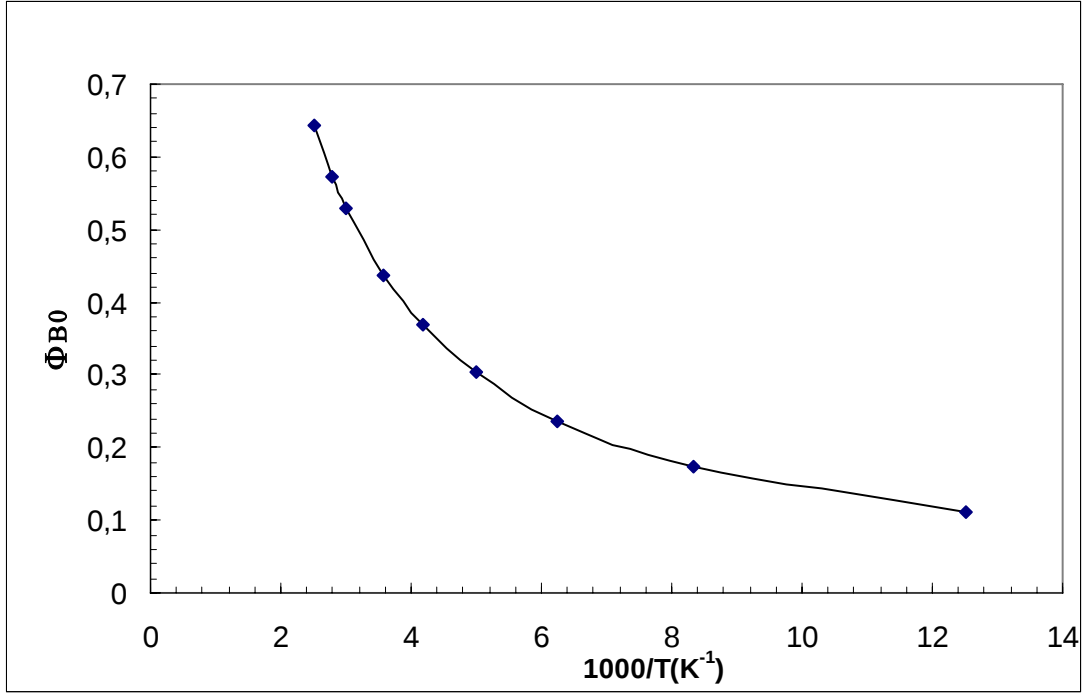
Şekil 6.6 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısının deneysel doğru beslem akım-gerilim karakteristikleri

Sıfır beslem-engel yüksekliği ($\Phi_{B0}=\Phi_B(I-V)$) ve diyot idealite faktörü n değerleri sıcaklığın fonksiyonu olarak sırasıyla Eş.[6.2] ve [6.3] yardımıyla hesaplandı ve değerler Çizelge 6.3’de verildi.

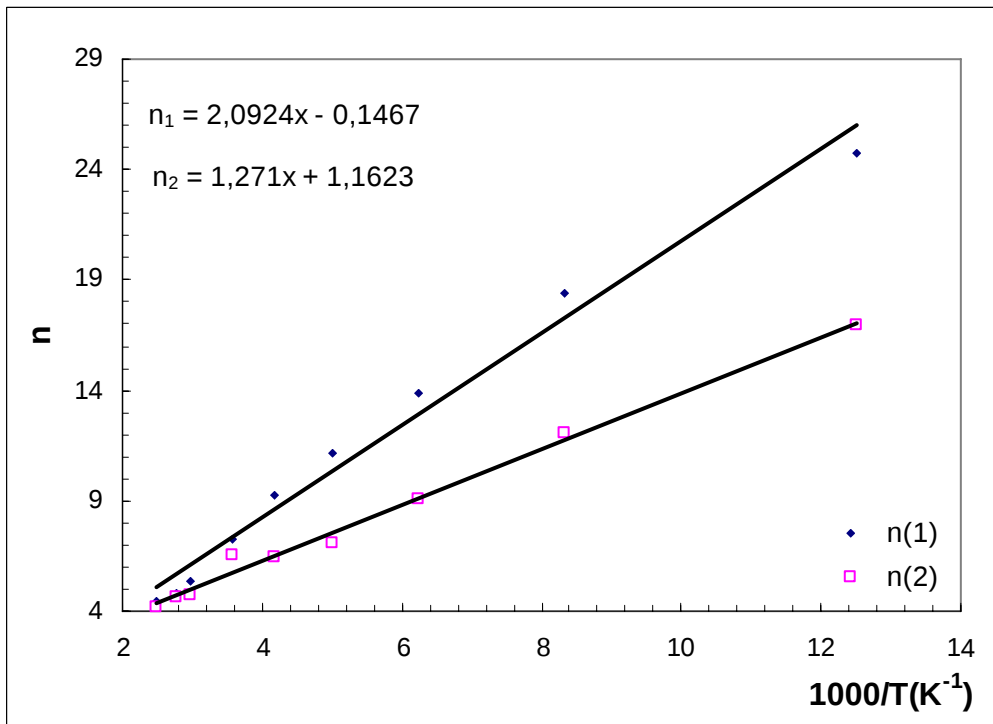
Çizelge 6.3 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs Schottky diyot için 80K-400K sıcaklık aralığında elde edilen deneysel parametreler

T (K)	I _{o1} (A)	I _{o2} (A)	n ₁	n ₂	Φ _{B1} eV	Φ _{B2} eV	N _{SS1} eV ⁻¹ cm ⁻²	N _{SS2} eV ⁻¹ cm ⁻²
80	5,81x10 ⁻⁵	1,11x10 ⁻⁵	24,75	16,94	0,11	0,12	1,53E+14	1,03E+14
120	7,01x10 ⁻⁵	1,70x10 ⁻⁵	18,38	12,05	0,17	0,19	1,12E+14	7,12E+13
160	7,94 x10 ⁻⁵	2,12x10 ⁻⁵	13,92	9,08	0,24	0,26	8,33E+13	5,21E+13
200	8,25x10 ⁻⁵	1,99x10 ⁻⁵	11,14	7,04	0,30	0,33	6,53E+13	3,89E+13
240	9,08x10 ⁻⁵	8,19x10 ⁻⁵	9,24	6,47	0,37	0,37	5,31E+13	3,52E+13
280	1,02x10 ⁻⁴	9,26x10 ⁻⁵	7,29	6,49	0,44	0,44	4,05E+13	3,54E+13
335	1,06x10 ⁻⁴	7,96x10 ⁻⁵	5,35	4,74	0,53	0,54	2,8E+13	2,4E+13
360	1,08x10 ⁻⁴	9,86x10 ⁻⁵	4,80	4,60	0,57	0,58	2,44E+13	2,32E+13
400	1,15x10 ⁻⁵	1,02x10 ⁻⁴	4,44	4,18	0,64	0,65	2,21E+13	2,04E+13

Çizelge 6.3'den görüldüğü gibi yarı-logaritmik doğru beslem I-V eğrilerinden elde edilen Φ_{B0} ve n değerleri sıcaklığa oldukça bağlıdır. Artan sıcaklıkla Φ_{B0} değeri artarken, n değerinin azalmaktadır. Sıfır beslem bariyer yüksekliği Φ_{B0} 'ın sıcaklığa bağlılığı Şekil 6.7'de ve diyot idealite faktörü n'in sıcaklığa bağlılığı ise Şekil 6.8' de verildi. En düşük (80 K) ile en yüksek (400 K) sıcaklıklar için bu değerler, sırasıyla n=24,75-4,18 ve Φ_{B0} =0,11- 0,64 eV elde edildi. Benzer sonuçlar literatürlerde de rapor edilmiştir (76-78).



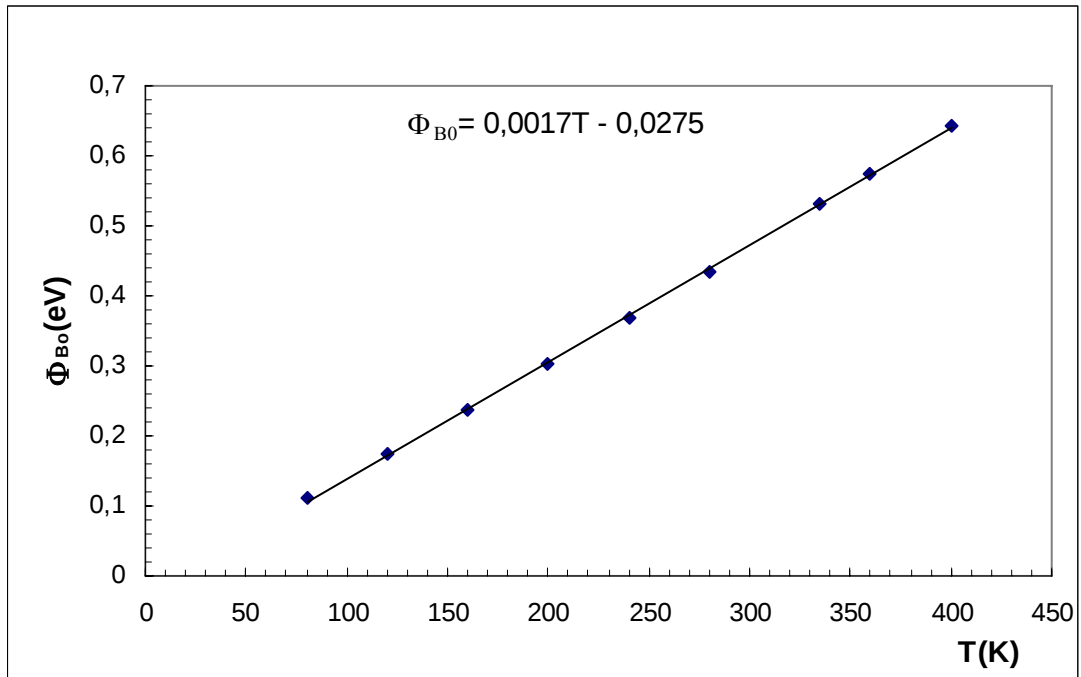
Şekil 6.7 Sıfır beslem bariyer yüksekliğinin $1000/T$ ile değişimi



Şekil 6.8 Diyot idealite faktörünün $1000/T$ ile değişimi

Elde edilen diyot idealite faktörü n değerleri, akım iletim mekanizmasının hem tuzak yoluyla tünellemeyi ve hem de termiyonik emisyonu içerdiğini işaret eder. Nagatomo ve arkadaşları (79), diyot idealite faktöründeki bu değişimlerin, bu tip yapıların performansı ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin Φ_{B0} artan sıcaklıkla artması, engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi olan negatif sıcaklık katsayısına aykırıdır. Bu davranış, sıcaklıkla sıfır beslem engel yüksekliği Φ_{B0} artarken idealite faktörünün azalması, özellikle düşük sıcaklıklarda, düşük engel yüksekliğine sahip olan bölgelerden oluşan akıma yani engel homojensizliğine atfedilebilir (Şekil 6.9).

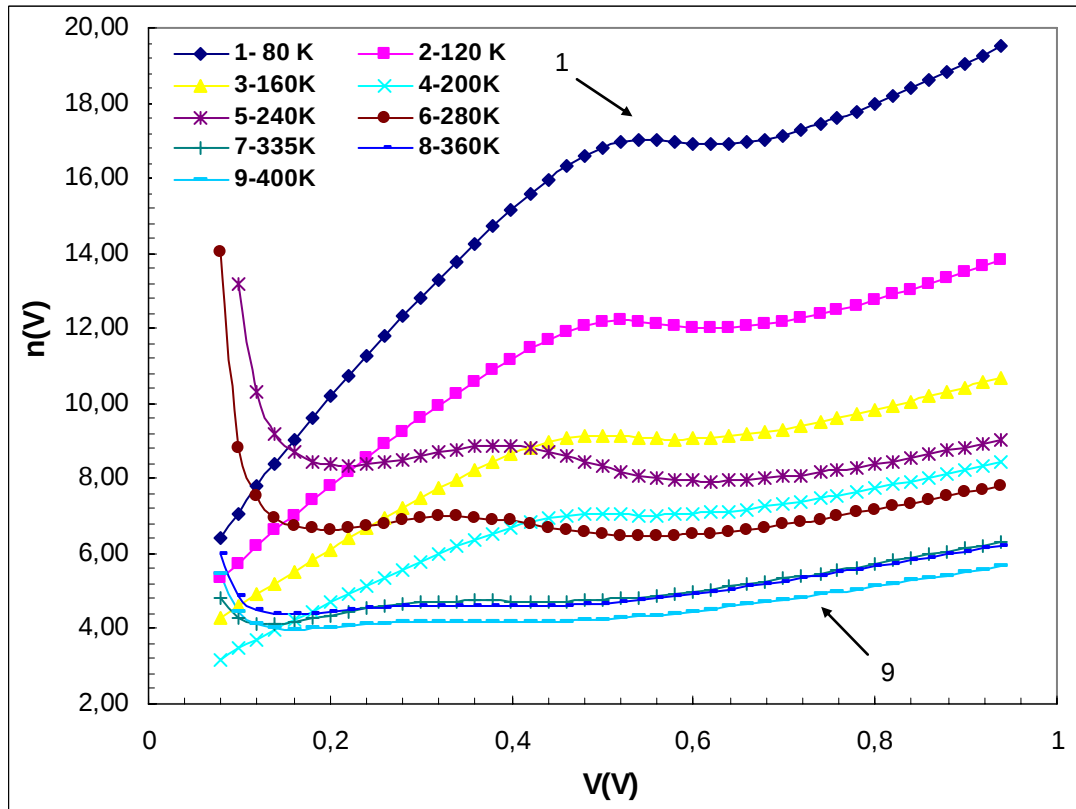


Şekil 6.9 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısı için sıcaklığa karşı Φ_{B0} (I-V) değişimi

Eşitlik 6.1 kullanılarak gerilime bağlı idealite faktörü için

$$n(V) = \frac{qV}{kT \ln(I/I_0)} \quad [6.5]$$

eşitliği yazılır. [6.5] eşitliği kullanılarak 80K-400K sıcaklık aralığında gerilime bağlı idealite faktörünün uygulanan voltaja göre grafiği şekil 6.10' da verildi.



Şekil 6.10. İdealite faktörünün uygulanan voltaja göre grafiği

Arayüzey durum yoğunluğunun hesaplanması

Aygıt performansını etkileyen diğer çok önemli bir faktör de arayüzey durum yoğunluğudur. Eğer $\text{Au/Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As/p-GaAs}$ yapısı, arayüzey durumlarına N_{ss} sahipse ve idealite faktörü gerilime bağlı değişiyorsa, Card ve Rhoderick (91) tarafından verilen idealite faktörü ifadesi Eş.[6.6] ile verilebilir.

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left(\frac{\varepsilon_s}{W_D} + N_{ss}(V) \right) \quad [6.6]$$

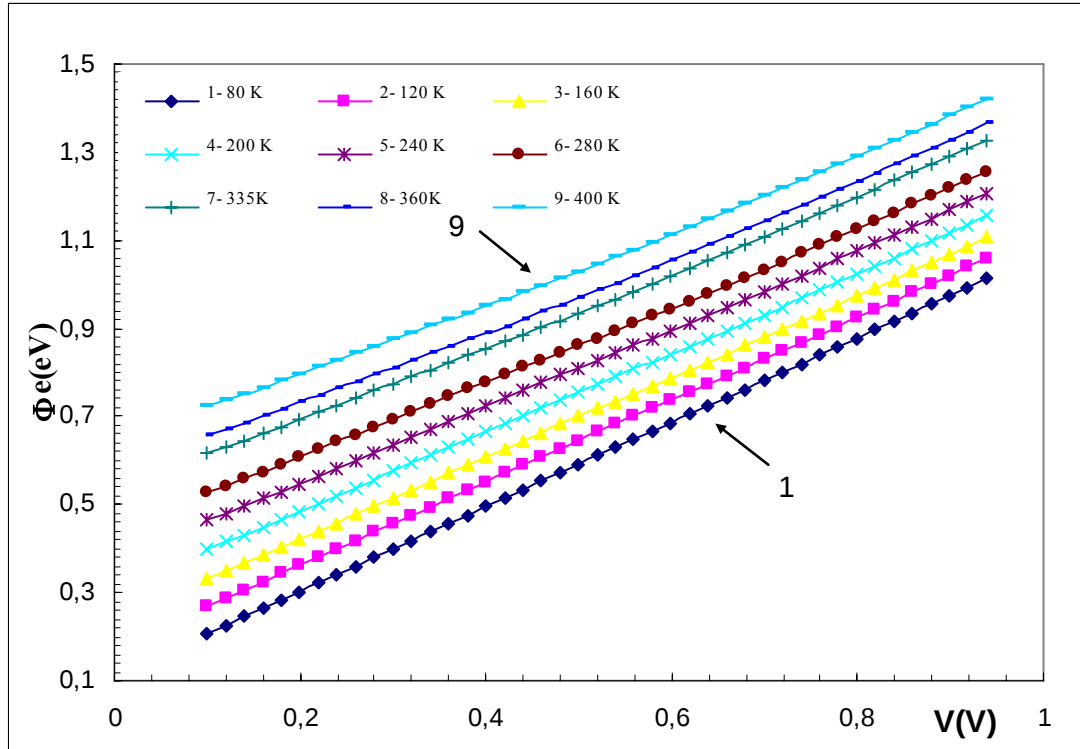
Burada ε_i ve ε_s sırasıyla yalıtkan tabakanın ve yarıiletkenin geçirgenliği ve değerleri $\varepsilon_i=3,5\varepsilon_0$, $\varepsilon_s=12,4\varepsilon_0$, $\varepsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm'dir. W_D uzay yükü bölgesi genişliği ve N_{ss} ise arayüzey durumlarının yoğunluğudur. Bu denklemde ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının ve hem de arayüzey durumlarının artmasıyla, doğru orantılı olarak artmaktadır. p-tipi yarıiletkenlerde, yarıiletkenin arayüzeyinde valans bandının tepesine göre, arayüzey durumlarının enerjisi E_{ss} , şu şekilde verilir (80):

$$E_{ss} - E_V = q(\Phi_e - V) \quad [6.7]$$

Burada Φ_e etkin engel yüksekliğidir ve Φ_e 'nin arayüzeyssel bir tabaka varlığı ve yalıtkan tabaka-yarıiletken arayüzeyinde yerleşmiş olan arayüzey durumları nedeniyle gerilime-bağımlı olduğu kabul edilir. Etkin engel yüksekliği Φ_e , engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağımlı olduğu göz önünde bulundurularak şu şekilde verilir:

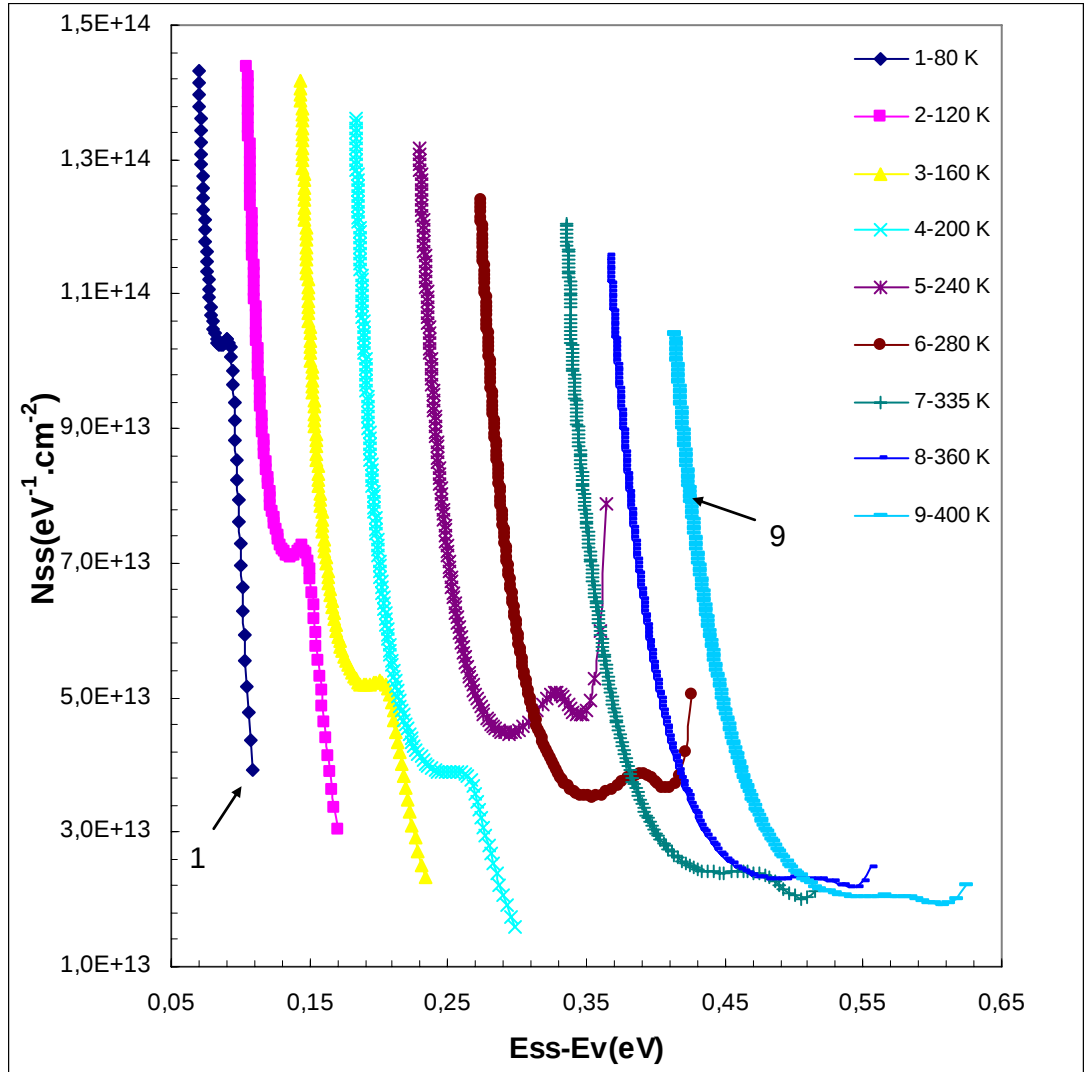
$$\Phi_e = \Phi_{B0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)} \right) (V - IR_s) \quad [6.8]$$

Eşitlik 6.8 kullanılarak gerilime bağlı etkin engel yüksekliğinin 80K-400K sıcaklık aralığında uygulanan voltaja göre grafiği şekil 6.11 'de verildi.



Şekil 6.11. Gerilime bağlı etkin bariyer yüksekliğinin uygulanan voltaja göre değişimi

Doğru beslem I-V karakteristiklerinden ve Eş.[6.7] kullanılarak arayüzey durum yoğunluklarının ($E_{ss}-E_v$) aralığındaki dağılım profili her sıcaklık için elde edilerek Şekil 6.12’de verildi. Ayrıca voltajdan bağımsız olan n_1 ve n_2 değerleri içinde N_{ss} değerleri her sıcaklık için hesaplanıp çizelge 6.3 ‘de verildi.



Şekil 6.12 ($E_{ss}-E_v$)'nin fonksiyonu olarak arayüzey durumlarının sıcaklığa bağımlı yoğunluk dağılım profili

Şekilden de görüldüğü gibi N_{ss} değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu ortalama davranış sıcaklığın etkisi nedeniyle yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinin moleküler yeniden yapılanmasına ve düzenlenmesine atfedilir (81). Şekil 6.12'den de görülebileceği gibi, tüm sıcaklıklar için N_{ss} 'te orta bölgeden valans bandına doğru keskin deneysel bir artış olur ve özellikle düşük sıcaklıklarda N_{ss} eğrileri bir minimuma sahiptir.

I-V karakteristiklerinde Cheung fonksiyonlarının kullanılması

Schottky diyotlarında, engel yüksekliği ile doğru beslem akım-gerilim ilişkisinin termiyonik emisyon teorisine göre Eş.[6.1] ile verildiğini belirtmiştik. Seri direnç ve idealite faktörünün küçük değerleri için Eş.[6.1] kullanılmaktadır.

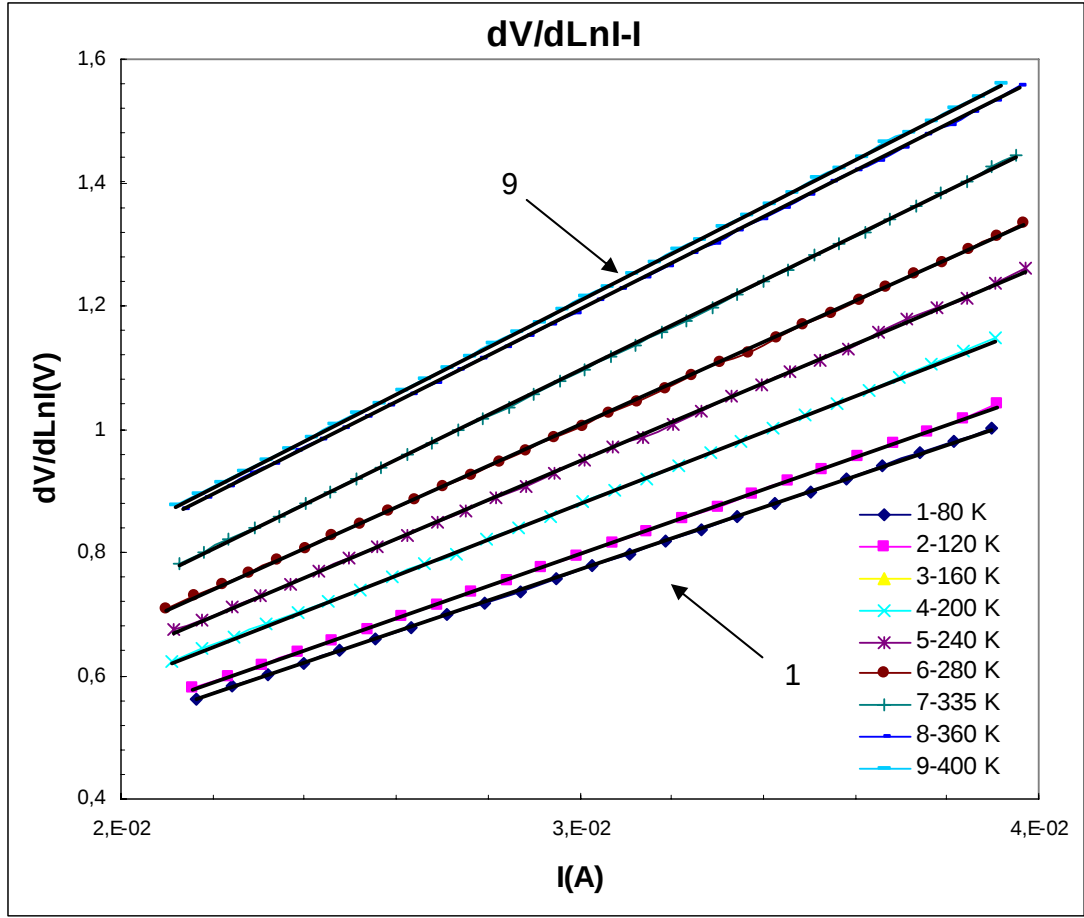
Buna ilaveten son zamanlarda yüksek seri direnç ve idealite faktörüne sahip Schottky kontaklarında; seri direnç (R_s), idealite faktörü (n) ve sıfır belsem engel yüksekliği (Φ_{B0}) gibi temel diyot parametrelerini tayin etmek amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir (71-74). Bunlardan bir tanesi de Cheung fonksiyonlarının kullanımıdır (71). Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen fonksiyonların grafiklerinden seri direnç, idealite faktörü ve sıfır beslem bariyer yüksekliği değerleri bulunabilir.

Eş.[6.1]'i düzenlersek Eş.[6.9] ve [6.10]'de verilen Cheung fonksiyonlarını elde ederiz.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + R_s I \quad [6.9]$$

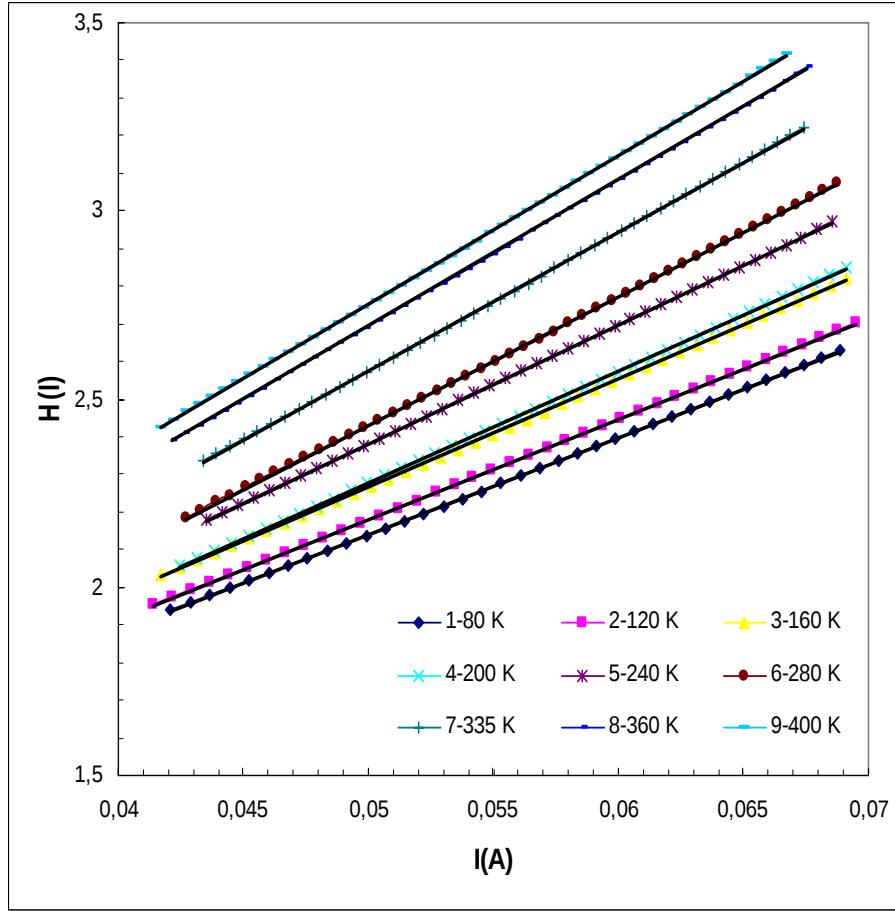
$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) = IR_s + n\Phi_{B0} \quad [6.10]$$

Eş.[6.10]'daki Φ_{B0} doğru beslem I-V karakteristiklerinin yüksek gerilim bölgesinde, $H(I)$ -I grafiğinde akım sıfırken $H(I)$ 'nın y-eksenini kestiği noktadan elde edilen engel yüksekliğidir. Eş.[6.9] kullanılarak elde edilen grafik geniş bir akım aralığında lineer bir doğrudur. Bu $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinin eğimi direkt olarak R_s değerini ve doğrunun y-eksenini kesme noktası da nkT/q değerini verir. n ve R_s değerleri Şekil 6.13 yardımıyla elde edildi ve Çizelge 6.4'te verildi.



Şekil 6.13 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapı için $dV/d(\ln I)$ 'ya karşı I grafiği

Eş.[6.9] kullanılarak elde edilen n değeri, Eş.[6.10]'da kullanılarak engel yüksekliği elde edildi. Aynı zamanda Eş.[6.10] kullanılarak elde edilen $H(I)$ - I grafiği de geniş bir akım aralığında bir doğrudur. Bu doğrunun eğimi, bize direkt olarak R_s değerini ve y-eksenini akım sıfır değerinde kesme noktası da $n\Phi_{B0}$ değerini verir. Böylece, yaklaşımın tutarlılığını kontrol etmek için, ikinci bir yoldan R_s değerinin elde edilmesi sağlanır. Eş.[6.9] ve [6.10]'de verilen Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafiklerinden elde edilen n , Φ_{B0} ve R_s değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.14 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısı için H(I)-I grafiği

Çizelge 6.4 Au/Al_{0.2}Ga_{0.8}As/p-GaAs yapısı için doğru beslem I-V karakteristiğinden 80K-400K sıcaklık aralığında elde edilen deneysel veriler

T(K)	dV/dlnI		H(I)	
	n	R _s [Ω]	R _s [Ω]	Φ _{B0} [eV]
80	3,40	24,91	25,73	0,252
120	2,22	25,76	26,64	0,383
160	1,68	27,75	28,76	0,491
200	1,23	28,55	29,68	0,646
240	1,07	30,75	31,60	0,744
280	0,92	32,70	34,10	0,785
335	0,88	35,53	36,99	0,820
360	2,05	37,47	38,92	0,364
400	1,91	38,04	39,48	0,405

7. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada öncelikle $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ süperörgü yapısı Moleküler Demet Epitaksi metodu ile büyütüldü. Büyütülen $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının yapısal ve elektriksel özellikleri incelendi. Yapısal özelliklerinin anlaşılabilmesi için yüksek çözünürlüklü x-ışınları kırınımı ve elektriksel özelliklerinin incelenebilmesi için sıcaklığa bağlı akım gerilim (I-V) ölçümleri 80 K- 400 K sıcaklık aralığında incelendi.

Büyütme işlemi Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken İleri Araştırma Laboratuvarında bulunan VG Semicon firması tarafından üretilen V80H-10 markalı cihaz kullanılarak gerçekleştirildi.

MBE metodu ile büyüttüğümüz $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının yapısal karakterizasyonu için yine STARLAB'ta X-ışını laboratuvarındaki 4 kristalli monokromatör içeren Bruker-AXS D8 Discover X-ışını difraktometresi kullanıldı.

Çoklu epitaksiyel tabakaların X-ışını kırınım metodu ile incelenmesi, MBE tabanlı örneklerde tabaka kalınlıklarının ve örgü yapısının anlaşılmasında gerekli kimyasal bileşenlerin belirlenmesinde oldukça yararlıdır. Tabaka kalınlıkları genelde rocking eğrisinin piklerinden belirlenirken örneğin kimyasal bileşenleri eğrinin geniş veya dar açıda yerleşmesinden anlaşılır. X-ışını cihazında ölçülen rocking eğrileri LEPTOS programı ile simüle edildi. Bu program hem kinematik hem de dinamik metotları kullanır ve kalınlık ölçümleri nanometre duyarlıktadır. Elde edilen veriler Şekil 6.5'de ve Çizelge 6.2'de verildi. Şekil 6.5'da verilen Rocking eğrisinin yatay eksenini hem numunenin hem de dedektörün birlikte hareket etmesi sonucu $\text{GaAs}(002)$ yansımali açı değerlerini gösterir. Düşey eksen şiddetin bağıl değerini gösterir. Şekilde görüldüğü ilk iki maksimum şiddetteki pikten alttaşa ait yansıma en yüksek pike ait ve hemen solunda yer alan pik ise tampon tabakaya aittir. Bu iki pike ek olarak, eşit aralıklı yansımalar girişim saçaklarıdır (fringes). Bu saçakların oluşma nedeni, çoklu girişimlerin meydana gelmesidir. X-ışınları malzemeden çıkmadan önce, farklı atomik düzlemlerden tekrar tekrar kırınıma uğrar (61). Bu girişim

saçakları yalnızca oldukça düzgün kalınlığa sahip ince tabakalarda ve düz, iyi hazırlanmış alttaş yüzeyinde görülür. Çizelge 6.2’de verilen kalınlık ve konsantrasyon değerlerinden görüldüğü üzere, X-ışınları karakterizasyonu sonucunda elde edilen ara yüzeylerin normal ve ölçülen kütle yoğunlukları, Al konsantrasyonu (%X) ve tabaka kalınlıkları değerleri, yapı büyütülürken göz önünde bulundurulacak değerlerle uyumluluk gösterir.

Büyüttüğümüz $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısının elektriksel özelliklerinin incelenbilmesinin bir yolu da kristale uygun ohmik ve doğrultucu kontakların yapılmasıdır. Oluşturulan kontakın ideal olması için, kontak yapılacak iki maddenin düşük dirençle temas etmesi ve kontak malzemelerinin yüzeylerinin yeterli derecede temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı malzememize metal (Au) kontak yapmadan önce malzemeye ıslak kimyasal aşındırma işlemi uygulandı. Aşındırma işlemi sonrasında malzeme yüzeyi organik kirlerden temizlendi ve pürüzsüz bir hale getirildi. Aşındırılan malzememize Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarında bulunan buharlaştırma sistemi kullanılarak arka yüzüne ohmik ve ön yüzüne doğrultucu kontak yapıldı..

Hazırlanan $\text{Au}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{p-GaAs}$ yapıların elektriksel ölçümleri STARLAB’ta bulunan Yarıiletken Laboratuvarında yapıldı. Doğru beslem (I-V-T) karakteristikleri 80K- 400 K sıcaklık aralığında incelendi. İdeal durumdan sapmaya neden olan ve aygıt performansını etkileyen önemli faktörlerden arayüzey durum yoğunluğu N_{ss} ve seri direnç R_s değerleri gerilimin ve sıcaklığın fonksiyonu olarak dağılım profilleri elde edildi. Sırasıyla Şekil 6.12 ve Çizelge 6.4’de verilen bu parametrelerin hem sıcaklık hem de gerilime oldukça bağlı olduğu gözlemlendi.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde n ve N_{ss} değerlerinin artan sıcaklıkla azalırken, Φ_{Bo} değerlerinde artma gözlemlendi. Doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin Φ_{Bo} , sıcaklıkla artması (Şekil 6.10) engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi olan negatif sıcaklık katsayısına aykırıdır. Bu davranış, özellikle düşük sıcaklıklarda, düşük engel yüksekliğine sahip olan bölgelerden oluşan akıma yani engel homojensizliğine atfedilebilir.

Elde edilen verilerden arayüzey durum yoğunluğunun artan sıcaklıkla azaldığı gözlemlendi. Bu durum sıcaklığın etkisi nedeniyle yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinin moleküler yeniden yapılanmasına ve düzenlenmesine atfedilir (83).

Diyot idealite faktörü n değerlerinin sıcaklıkla azalması akım iletim mekanizmasının hem tuzak yoluyla tünellemeyi ve hem de termiyonik emisyonu içerdiğini işaret eder. Diyot idealite faktöründeki bu değişimler, bu tip yapıların performansı ile ilişkilidir (86).

KAYNAKLAR

1. Boylestad R. Nashelsky L., “Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi”, **Prentice-Hall, Inc.**, New York, 3-25 (2000).
2. Yu, Y.P., Cardona, M., “Survey of Semiconductors”, Fundamentals of Semiconductors Physics and Materials Properties, Third edition, **Springer – Verlag**, Berlin Heidelberg New York, 578-582 (2003)
3. Panish M. B., Hayashi I. and Sumski S., **IEEE J. QE** 5, 210 (1969).
4. Hayashi I., Panish M. B. and Foy P.W., **IEEE J. QE** 5, 211 (1969).
5. Osbourn C. G., **J. Appl. Phys.**, 53, 1586 (1982).
6. Günther K. G., **Z. Naturforsch.**, 13a, 1081 (1958).
7. Davey J. E. and Pankey T., **J. Appl. Phys.**, 39, 1941 (1968).
8. Arthur J. R., **J. Appl. Phys.**, 39, 4032 (1968).
9. Arthur J. R. and Lepore, J.J., **J. Vac. Sci. Tech.**, 6, 545 (1969).
10. Cho A. Y. and Arthur J. R., **Progress in Solid State Chemistry**, 10, 157 (1975).
11. Arthur J. R., A.B.D Patenti #361593, (gönderme Eylül 1967, yayınlanma, 26 Ekim 1971).
12. Cho A. Y., **J. Vac. Sci. Technol.**, 8, S31 (1971).
13. Cho A. Y., **J. Appl. Phys.**, 41, 2780 (1970).
14. Cho A. Y., **J. Appl. Phys.**, 42, 2074 (1971).
15. Cho A. Y., Panish M. B. and Hayashi I., **Proc. Third. Int. Sympo. On GaAs and Related Compounds**, Inst. of Phys., London, p18, (1970).
16. Cho A. Y., **Appl. Phys. Lett.**, 19, 467 (1971).
17. Cho A. Y. and Hayashi I., **Solid State Electron.**, 14, 125 (1971).
18. Cho A. Y., Panish M. B. and Hayashi I., **Symp. On Gallium Arsenide and Related Compounds**, Inst. of Phys., 18, (1971).
19. Cho A. Y. and Hayashi I., **J. Appl. Phys.**, , 4422 (1971).

20. Cho A. Y. and Panish M. B., *J. Appl. Phys.*, 43, 5118 (1972).
21. Cho A. Y. and Casey H. C., Jr., *J. Appl. Phys.*, 45, 1258 (1974).
22. Parker E. H. C, “The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy”, *Plenum*, New York, (1985).
23. Chang L. L., Ploog K., “ Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures”, Series *E:Applied Sciences*, 87, (1985).
24. Buget U.” PN Junctions Device,”*Gaziantep üniversitesi yayınları*,(1996).
25. Beiser A., “Concepts Of Modern Physics”, *McGraw-Hill*, 5, (1995)
26. Sze S.M., “Semiconductor Devices Physics and Technology”, *John Wiley&Sons*, (2002)
27. Panish M.B. , Ilegems M. ,”Progress in Solid State Chemistry”, *Prentice-Hall,Inc*,7, 39 (1972).
28. Casey H. C., Panish M. B., “Heterostructure Lasers”, *Academic*, New York, 193, (1978)
29. Scuhubert, E.F., “What is difference between a MQW and a SL?”, *Rensselaer Polytechnic Institue*, 2003
30. L.Esaki and R. Tsu, “Superlattice and Negative Conductivity in Semiconductors”, *IBM Res. Note*, RC-2418, March (1969).
31. Sorensen, C. B., “MBE – Growth and processing and characterization of low dimensional GaAs/AlAs heterostructures”, Ph.D. Thesis, *Mikroelektronik Centret and Niels Bohr Instuted f. AFG, Copenhagen*, 14-20 (1998)
32. Tolmatchev, A., “Electronic archive New Semiconductor Materials, Characteristics and Properties”, *Prentice-Hall,Inc*,7, 39 (1995).
33. Look, D. C., “Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices”, *John. Wiley and Sons*, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1-57 (1989).
34. Adachi, S., “Properties of Aluminum Gallium Arsenide “,*J. Appl. Phys.*, 58(3), R1-29, (1985)

35. Adachi S. , “Properties of Aluminum Gallium Arsenide”, the *Institution of Electrical Engineers*, London: INSPEC, (1993).
36. Streetman, Ben G., “Solid State Electronic Devices”, Englewood Cliffs, N.J., *Prentice Hall*, (1995).
37. Pierret, Robert, F., “Semiconductor Device Fundamentals”, Reading, *Addison-Wesley*, (1996).
38. Sorensen, C. B., “MBE – Growth and processing and characterization of low dimensional GaAs/AlAs heterostructures”, Ph.D. Thesis, *Mikroelektronik Centret and Niels Bohr Instuted f. AFG, Copenhagen*, 14-20 (1998)
39. E.H.C.Parker, “The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy”, *Plenium pres* (1985)
40. Ünlütürk, A.F., “Moleküler Demet Yöntemleriyle Kristal Büyütme”, Yüksek lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-29, (2003).
41. Cheng K. Y., *Proceedings of The IEEE*, 85, NO:11, 1694-1714 (1997).
42. “V80H-10 Molecular Beam Epitaxy System Operator’s Manual”, **Molecular Beam Epitaxy, 2-5 - 2-20**
43. M.Missous, “ Uniformity of improved high- quality GaAs and AlGaAs epilayers and Schottky barriers prepared by Molecular Beam Epitaxy”, *Semiconductor Science Technology*, 7, A249-A254 (1992)
44. Herman M. A., Sitter H., “Molecular Beam Epitaxy”, *Springer*, Germany (1996).
45. Dingle R., Weisbuch C., Störmer H. L., Morkoç H. and Cho A. Y., *Appl. Phys. Lett.*, 40, 507 (1982).
46. Neave J. H.and Joyce B. A., *J. Crystal Growth*, 43, 204 (1978).
47. Neave J. H.and Joyce B. A., *J. Crystal Growth*, 44, 387 (1978).
48. Stall R. A., Wood C. E. C., Kirchner P. D. And Eastman L. F., *Electron. Lett.*, 16, 171 (1980).
49. Fischer R. , Klem J., Drummand T. J., Thorne R. E., Kopp W., Morkoç H. , Cho A. Y. , *J. Appl. Phys.*, 51, 2508 (1983)

50. Foxon C. T., Harvey J.A. and Joyce B.A, *J. Phys. Chem. Solids*, 34, 1693 (1973).
51. Foxon C. T. and Joyce B. A., *Surf. Sci.* , 50, 434 (1975).
52. Foxon C. T. and Joyce B. A., *Surf. Sci.* , 64, 293 (1977).
53. Chang L. L., Segmüller A. And Esaki L., *Appl. Phys. Lett.*, 28, 39 (1976).
54. Morkoç H., Drummond T. J., Kopp W. And Fischer R., *J. Electrochem Soc.*, 129, 824 (1982).
55. Wicks G., Wang W. I., Wood C. E. C., Eastman L. F. And Rathbun, *J Appl. Phys.*, 52, 5792 (1981).
56. Swaminathan V. And Tsang W. T., *Appl. Phys. Lett.*, 38, 347 (1981).
57. Morkoç H., Cho A. Y. And Radice Jr., *J. Appl. Phys.*, 51, 4882 (1980).
58. Foxon C. T., *Second European Workshop on Molecular Beam Epitaxy*, Brighton, (1983).
59. Kittel C., “Katıhal Fiziğine Giriş”, Bekir Karaoğlu, *Güven Kitap Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ*, 6 (1996)
60. Aygün E., Zengin M., “Kuantum Fiziği”, *Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü*, Ankara (1998)
61. Warren B. E., “X-Ray Diffraction”, *Addison Wesley*, Okuma, (1969).
62. Vandenberg J. M., Hamm R. A., Panish M. B., Temkin H., *J. Appl. Phys.*, 62, 1278 (1987).
63. Vandenberg J. M., Hamm R. A., Macrander A. T., Panish M. B., Temkin H., *Appl. Phys. Lett.*, 62, 1278 (1987).
64. Bartels W. J., *J. Vac. Sci. Technol.*, B1, 328 (1983).
65. Vandenberg J. M., Panish M. B., Temkin H., Hamm R. A., *Appl. Phys. Lett.*, 53, 1920 (1988).
66. Bartels W. J., “Thin Film Growth Techniques for Low Dimensional Structures”, NATO ASI series, Dobson P. J., Farrow R. F. S., *Plenum*, New York, (1987).
67. Rhoderick E. H. and Williams R. H., “Metal-Semiconductor Contacts”, *Oxford*, (1988).

68. Razeghi Manijeh, "Fundamentals of Solid State Engineering", **Kluwer Academic Publishers**, (2002).
69. Colinge J. P., Colinge C. A., "Physics of Semiconductor Devices", **Kluwer Academic Publishers**, (2002).
70. Sharma B. L., "Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junction and Their Application", **J. Appl. Phys.**, New York, (1984).
71. Cowley A. M., Sze S. M., **J. Appl. Phys.**, 36, 3212, (1965).
72. Northrop D. C. And Rhoderick E. H., **Sol. Sta. Elec.**, 4, 37 (1978).
73. Rhoderick E. H., "Metal-Semiconductor Contacts", **IEE PROC.**, 129 (1), 1 (1982).
74. Chattopadhyay P. , Daw A. N., **Sol. Stat. Elec.**, 29, 555 (1986).
75. Wilson A. , "The Theory of Electronic Semiconductors", **Proc. R. Soc. Lend. Ser. A.**, 458, 1333 (1931).
76. Cheung S.K., Cheung N.W., **Appl.Phys. Lett.**, 49, 85-87, (1986).
77. Norde H., **J. Appl. Phys.**, 50(7), 50-54 (1979)
78. Bohlin K. E., **J. Appl. Phys.**, 60(3), 1223-1224.
79. Keffous A., Siad M., Mamma S., Bekkacem Y. et al., **Appl. Surf. Sci.**, 218, 336-342, (2003)
80. Altındal Ş., Karadeniz S., Tuğluoğlu N., Tataroğlu A., **Solid-State Elect.**, 47, 1847 (2003)
81. Singh A., Reinhart K.C., Anderson W.A., **J. Appl. Phys.**, 68(7) 3475 (1990)
82. Altındal Ş., Tataroğlu A., Dökme İ., **Solar Energy Materials and Solar Cells** **85**, 345 (2005)
83. Nagotomo T., Ando M., Omoto O., **Jpn J. Appl. Phys.** ,18, 1103 (1979)
84. Card H.C., Rhoderick E.H., **J. Phys. D** , 4, 1589 (1971)
85. Hudait M.K., Krupanidhi S.B., **Solid State Electron.**, 44, 1089 (2000)
86. Akkal B., Benamara Z., Boudissa A., Bouiadjra N.B, et al. **Mater Sci. Eng. B55**, 162 (1998)

87. Nicollian E.H., Brews J.R., “Metal Oxide Sem. (MOS) Physics and Technology”, **Wiley**, New York, (1982)
88. Bhuiyan A. S., Martinez A. and Esteve D., ***Thin Solid Films***, 161, 93 (1988)
89. Hackam R., Harrop P., ***Trans. On Elect. Dev.***, 19, 12 (1972)
90. Tataroğlu A., Altındal Ş., Karadeniz S. , Tuğluoğlu N., ***Microelectronics Journal***, 34, 1043 (2003)
91. Stillman G. E., Brozel M. R., “Properties of Gallium Arsenide 3rd Edition”, ***INSPEC***, 705 (1996)
92. Karataş Ş., Altındal Ş., Türüt A., Özmen A., ***Applied Surface Science***, 217 (2003)

ÖZGEÇMİŞ

Hilal GÜMÜŞ 1980 yılında Ankara’da doğdu. İlk öğrenimini Ankara Atıf Benderlioğlu İlköğretim okulunda, orta öğrenimini ise Ankara Alparslan Anadolu Lisesinde tamamladı. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsünde Tezsiz Yüksek Lisans programını tamamladı. Halen Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik anabilim dalında tezli yüksek lisans programına devam etmektedir.